

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Лободзинський Вадим Юрійович**

УДК 621.315

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ПРЕДСТАВЛЕНИХ  
БАГАТОПОЛЮСНИКАМИ ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ІЗ  
РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ**

05.09.05 – теоретична електротехніка

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ В.Ю.Лободзинський

Науковий керівник: Щерба Анатолій Андрійович  
доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

**Лободзинський В.Ю.** Перехідні процеси в представлених багатополюсниками трифазних колах із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.05 «Теоретична електротехніка» (141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання спрямованого на розвиток теорії багатополюсників у напрямку врахування міжфазних зв'язків в електричних колах з розподіленими параметрами для удосконалення методів розрахунку сталих і перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, що представлені багатополюсними елементами.

Основна частина дисертації складається зі вступу, чотирьох розділів розділених на підрозділи, висновків, списку використаної літератури та додатками із списком опублікованих праць здобувача за темою дисертації і наукових семінарів та конференцій, на яких доповідались отримані результати, актами впровадження результатів дисертації та іншого.

Метою дисертації є розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів.

Постановка такого наукового завдання обґрунтована сучасною тенденцією в теоретичній електротехніці розглядати багатофазні електричні кола як послідовно-паралельне з'єднання різних  $n$ -полюсників, що забезпечує підвищення ефективності розрахунку перехідних електромагнітних процесів в багатофазних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

У дисертаційній роботі розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних кабельних лініях – колах з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками, що забезпечило створення методики розрахунку електромагнітних коливань в трифазних кабельних лініях з урахуванням міжфазних зв'язків.

Розроблено нову математичну модель трифазних електричних кіл, як розгалужених кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах та з урахуванням взаємних електромагнітних зв'язків.

На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних кабельних лініях електропередачі, як трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними зв'язками, вперше визначено особливості виникнення в них власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

Удосконалено метод розрахунку перехідних електромагнітних процесів в кабельних лініях електропередачі, як у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і взаємними електромагнітними зв'язками. Метод дозволяє підвищити точність розрахунку, шляхом обліку сукупності особливостей електромагнітних процесів в схемах заміщення, що

визначаються взаємоіндуктивними зв'язками в наслідок електромагнітного поля між однофазними кабелями трифазного електричного кола.

Досліджено математичну модель перехідних процесів в трифазних колах з міжфазними зв'язками і розподіленими параметрами, отримано перехідні функції струмів і напруг з урахуванням нульових і ненульових початкових умов для будь-якої схеми комутації, що дозволяє, проводити розрахунки і аналіз перехідних процесів в трифазних кабельних лініях і забезпечує рішення практичних завдань.

Виконані дослідження показали, що при складанні фізичних моделей і при моделюванні за допомогою спеціальних комп'ютерних програм для розрахунку перехідних процесів доцільно використовувати ланцюгові схеми заміщення кола з розподіленими параметрами.

Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополюсників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні переріз екранів та кількість їх транспозицій.

На підставі теорії багатополюсників було удосконалено методику розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі з урахуванням наведеної ЕРС взаємоіндукції. Реалізована методика в програмному пакеті Matlab/Simulink, який забезпечує визначення особливостей протікання перехідних процесів у трифазних кабельних лініях з уточненням кількісних характеристик цих процесів.

Практичне застосування підходу передбачає подання багатополюсних елементів схемами заміщення, пов'язане з обмеженням розміру схеми, яка аналізується, число незалежних елементів кола, а так само проблемами розробок схем заміщення в якості математичної моделі елемента системних

параметрів багатополюсника. Зменшення розмірів системи дослідження зі збереженням багатополюсників електричного кола досягається використанням ланцюгових схем заміщення, що дозволяє аналізувати кола з багатополюсними елементами з метою створення єдиного підходу для аналізу і проектування електричних кіл у вигляді високовольтних кабельних ліній електропередачі для підвищення ефективності їх розрахунку із застосуванням програмних обчислювальних засобів.

Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом представлення цих кіл багатополюсниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості між фазних електромагнітних зв'язків.

У роботі проведено дослідження комп'ютерної моделі для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у потужній електроенергетичній системі, що містить надвисоковольтну кабельну лінію з зшитополіетиленовою ізоляцією, яка реалізована у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink, дозволяє аналізувати різні режими роботи складних енергетичних систем з кабельними лініями, а на етапі їх проектування вибирати як раціональні схемно-конструктивні рішення, так і необхідне обладнання для захисту лінії в аварійних режимах роботи.

Отримані нові наукові результати у своїй сукупності мають важливе значення для розвитку теоретичної електротехніки в напрямку розвитку теорії розрахунку багатофазних електричних кіл з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками, зокрема високовольтних кабельних ліній електроенергетичного призначення.

Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розвитку теорії перехідних процесів в трифазних кабельних лініях, які моделюються

як кола з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками використано на заводі «Південкабель», Інституті електродинаміки НАН України та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».

*Ключові слова:* кола з розподіленими параметрами, багатополіусник, трифазні електричні кола, перехідні процеси, міжфазні зв'язки, кабелі.

## ABSTRACT

**Lobodzinskiy V.U.** Transients in represented by multipoles three-phase circuits with distributed parameters and electromagnetic coupling. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of the Candidate of Sciences (PhD) in Engineering degree on specialty 05.09.05 – "Theoretical Electrical Engineering" (141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics). – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem aimed at the development of the theory of multipoles in the direction of consideration of interphase connections in electric circuits with distributed parameters to improve the methods of calculation of constant and transient processes in three-phase electric circuits with distributed parameters represented by multipoles elements.

The main part of the dissertation consists of an introduction, four sections divided into sub-sections, conclusions, a list of used literature and appendices with

a list of published works of the applicant on the topic of the dissertation and scientific seminars and conferences, which reported the results obtained, acts of implementation of the results of his dissertation.

The aim of the dissertation is the development of methods of analysis of transients in three-phase circles with distributed parameters and interfacial connections based on the representation of such circles by multipoles, finding their corresponding concentrated parameters and determining the boundary and initial conditions of occurrence of transients.

The statement of such a scientific task is justified by the modern tendency in theoretical electrical engineering to consider multiphase electric circuits as a series-parallel connection of different  $n$ -poles, which increases the efficiency of calculation of transient electromagnetic processes in multiphase circuits with distributed parameters and interphase.

In the dissertation the method of calculation of electromagnetic transients in three-phase cable lines - circuits with distributed parameters and electromagnetic connections was developed, which provided creation of a method of calculation of electromagnetic vibrations in three-phase cable lines taking into account interphase connections.

A new mathematical model of three-phase electric circuits, as branched circuits with distributed parameters and interphase connections, is developed by compiling differential equations of state of these circuits, determining boundary and initial conditions for calculating transient processes occurring in them under normal and emergency conditions, and taking into account the reciprocal conditions.

On the basis of modeling and analysis of transient voltages and currents in three-phase cable transmission lines, as three-phase electric circuits with distributed parameters and mutual electromagnetic connections, the peculiarities of

the occurrence of their own electromagnetic oscillations under complex boundary conditions and commutations have been determined for the first time.

The method of calculation of transient electromagnetic processes in cable transmission lines, as in three-phase electric circuits with distributed parameters and mutual electromagnetic connections, has been improved. The method allows to increase the calculation accuracy by taking into account the set of electromagnetic process features in the substitution circuits, which are determined by the inductive couplings due to the electromagnetic field between single-phase cables of a three-phase electric circuit.

The mathematical model of transient processes in three-phase circuits with interphase bonds and distributed parameters is investigated, transient functions of currents and voltages are taken into account with zero and non-zero initial conditions for any switching scheme that allows to calculate and analyze transient lines in three-phase circuits. and provides practical solutions.

Studies have shown that it is advisable to use circuit circuits with distributed parameters for the calculation of transients when compiling physical models and when using special computer programs to calculate transients.

The mathematical model for the calculation of transient electromagnetic processes in three-phase cable transmission lines has been improved based on the use of multipolar theory and taking into account the effect of the induced EMFs on the induced currents in the cable screens at their various transitions, which allows to determine the required cross-section of the screens and the number of their transitions.

Based on the multipoles theory, the technique of calculation of transient electromagnetic processes in three-phase cable transmission lines has been improved, taking into account the induced EMF interaction. The technique is implemented in the Matlab/Simulink software package, which provides the



definition of transient flow characteristics in three-phase cable lines, specifying the quantitative characteristics of these processes.

The practical application of the approach involves the representation of multipoles elements by substitution schemes, which is associated with the limitation of the size of the circuit being analyzed, the number of independent circuit elements, as well as the problems of designing substitution schemes as a mathematical model of the element of the system parameters of the multipoles. The reduction of the size of the research system with the conservation of multipoles electric circuits is achieved by the use of circuit circuits, which allows to analyze circuits with multipoles elements in order to create a unified approach for the analysis and design of electrical circuits in the form of high-voltage cable transmission lines to improve their calculation using software calculations.

The method of calculation of electromagnetic transients in three-phase electric circuits with distributed parameters and interfacial connections has been developed by presenting these circles to multiples with concentrated parameters, which take into account the peculiarities between phase electromagnetic bonds.

The paper investigates a computer model for the calculation of transient electromagnetic processes in a powerful electric power system containing a high-voltage cable line with cross-linked polyethylene insulation, implemented in a computer environment Matlab/Simulink, allows to analyze the different modes of operation of complex power systems with cable lines, and at the stage of their design to choose both rational circuit design solutions and the necessary equipment to protect the line in emergency modes.

The new scientific results obtained in their totality are important for the development of theoretical electrical engineering towards the development of the theory of calculation of multiphase electric circuits with distributed parameters and interphase connections, in particular high-voltage cable power lines.

Theoretical and practical results of the dissertation on the development of the theory of transients in three-phase cable lines, which are modeled as circles with distributed parameters and electromagnetic connections, were used at the Yuzhkabel cable plant, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine and introduced into the teaching process at the electrotechnical department University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in teaching the subjects «Theoretical Foundations of Electrical Engineering» and «Theory electrical and magnetic circuits».

*Keywords:* distributed circuits, multipole, three-phase electric circuits, transients, interphase connections, cables.

.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Статті у фахових наукових виданнях України:

1. Щерба А. А., Лободзинський В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2011. Ч.2. С. 271–276.
2. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І., Щерба А. А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при коммутациях кабельной линии электропередачи в сверхвысоковольтных трехфазных электрических сетях. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.1. С. 155–158.
3. Лободзинський В. Ю., Щерба А. А. Моделирование и анализ переходных процессов в трехфазной высоковольтной кабельной линии. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.4. С. 151–156.
4. Chibelis V., Lobodzinskyi V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol.6, №2. pp. 63–66.
5. Лободзинський В.Ю. Аналіз перенапруг та струмів однорідної довгої лінії при несиметричних коротких замиканнях. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017. №2. С. 38–44. – *Входить до МНМБД Index Copernicus.*
6. Лободзинський В.Ю. Дослідження форм кривих перехідного процесу при комутаціях. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. №47. С. 11–15. – *Входить до МНМБД Elibrary.*
7. Чибеліс В. І. Лободзинський В.Ю. Аналіз методів розрахунку електромагнітних перехідних процесів багатофазних ліній

електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи». 2017. № 870. С. 76–82.

8. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 96–102. – *Входить до МНМБД Index Copernicus*.

9. Лободзинський В. Ю., Довгаль М. О., Мудрик В. І. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів при пошкодженні кабельної лінії електропередачі. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки». 2018. Том 29 (68), №2. С. 46–50. – *Входить до МНМБД Index Copernicus*.

#### **Тези доповідей на наукових конференціях:**

10. Lobodzinskiy V., Maslak M. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks. In IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). 2015. pp. 96-98.

11. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line. In IEEE Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2017. pp. 448–451

12. Лободзинський В.Ю., Худик А.И. Математическая модель анализа перенапряжений на изоляции экрана в схеме с заземлением экранов по концам участка кабельной линии высокого напряжения. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 578–580.

13. Лободзинський В.Ю., Чибелис В.И., Фаріна О.А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при отключении ненагруженных линий электропередачи. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 583–585.

14. Лободзинський В.Ю. Анализ установившихся, импульсных и переходных электромагнитных процессов в кабельных линиях высокого напряжения. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

15. Лободзинський В.Ю., Жук Б.О. Математическая модель расчета эквивалентных однофазных схем замещения трехфазных схем с взаимоиндуктивными связями в виде четырехполюсника. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

16. Лободзинський В.Ю., Солоп Б.К. Анализ расчета электромагнитных переходных процессов в трехфазных цепях при произвольной коммутации. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

17. Лободзинський В.Ю., Метельская О.В. Анализ переходных процессов при подключении имитационной модели кабельной линии к источнику питания. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2014. С. 583–585.

18. Лободзинський В.Ю., Пустовий Т. П., Комісарова І. П. Аналіз методів моделювання елементів кабельних ліній у фазних координатах на основі теорії багатополюсників. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2015. С. 478-480.

19. Лободзинський В.Ю., Ілліна О. О., Губчук А. Є. Методологічний підхід для побудови моделей статичних багато провідних елементів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2016. С. 423-425.

20. Лободзинський В.Ю. Аналіз методики чисельного розрахунку перехідних процесів при комутаціях кабельних ліній. *Inzynieria i technologia. Wspolczesne tendencje w nauce i edukacji. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej*. Kraków (Poland). 2016. pp. 33–38.

21. Lobodzinskiy V., Tsyban Y., Lobodzinskaya T. Analysis of transients in case of changing a phase of power source at the moment of connection with cable lines. *Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje na rok 2016. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej*. Zakopane (Poland). 2016. pp. 62–65.

22. Лободзинський В.Ю. Теоретичні дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях високовольної кабельної лінії. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчуг. 2016. С. 239–241.

## ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РОЗГАЛУЖЕНИХ КІЛ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА МІЖФАЗНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ	25
1.1 Принципи моделювання електромагнітних процесів у багатофазних електричних колах.....	25
1.2 Методи розрахунку перехідних електромагнітних процесів у електричних колах з розподіленими параметрами.....	30
1.3 Узагальнений підхід до моделювання трифазних кіл із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками.....	34
1.4 Особливості дослідження перехідних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі високої напруги.....	37
1.5 Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ 2 ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ТРИФАЗНИХ КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ.....	48
2.1 Хвильові процеси при виникненні імпульсної напруги в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами.....	49
2.2 Електричні схеми заміщення та рівняння кіл з розподіленими параметрами і взаємоіндуктивними зв'язками.....	56
2.3 Математична модель перехідних процесів у трифазних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками.....	58
2.3.1 Визначення початкових умов.....	65
2.3.2 Визначення граничних умов.....	70
2.4 Висновки до розділу 2 .....	75

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ЯК БАГАТОПОЛЮСНИКАХ, ЩО ВРАХОВУЮТЬ ЇХНІ РОЗПОДІЛЕНІ ПАРАМЕТРИ ТА МІЖФАЗНІ ЗВ'ЯЗКИ.....	77
3.1 Урахування індукованих струмів у трифазних колах із електромагнітними зв'язками.....	77
3.2 Електричні схеми заміщення трифазних високовольтних кабельних ліній, як електричних кіл із міжфазними зв'язками.....	83
3.2.1 Особливості дослідження перехідних процесів у ланцюгових схемах заміщення трифазних кабельних ліній.....	84
3.2.2 Вибір кількості ланок схеми заміщення із зосередженими параметрами при аналізі перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками....	89
3.3 Математична модель трифазної високовольтної кабельної лінії, як електричної схеми з багатополюсними елементами.....	93
3.4 Ланцюгова схема заміщення трифазної кабельної лінії та її реалізація в програмі Matlab/Simulink.....	98
3.4.1 Визначення параметрів схеми заміщення моделі трифазної лінії з однофазними кабелями.....	99
3.4.2 Урахування транспозиції струмопровідних екранів фазних кабелів при моделюванні довгих трифазних ліній електропередачі.....	106
3.4.3 Використання багатополюсників та їх схем заміщення в програмі Matlab/Simulink для розрахунку перехідних процесів у довгих трифазних кабельних лініях.....	110
3.5 Висновки до розділу 3.....	119



РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЯК БАГАТОПОЛЮСНИКАХ, ЩО ВРАХОВУЮТЬ ЇХ ПАРАМЕТРИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗВ'ЯЗКИ....	122
4.1 Аналіз перехідних процесів у довгій трифазній кабельній лінії з урахуванням транспозиції струмопровідних екранів фазних кабелів і короткого замикання одного з них на землю.....	123
4.2 Перехідні процеси і залежність напруги на екранах відключеної від навантаження трифазної кабельної лінії від її довжини.....	128
4.3 Особливості урахування впливу початкової фази джерела електроживлення на електромагнітні процеси та перенапруги в колах довгої високовольтної трифазної кабельної лінії.....	140
4.4 Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі довгої трифазної кабельної лінії на напругу 330 кВ.....	144
4.5 Висновки до розділу 4.....	154
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	179
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	183

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Наукові задачі розрахунку перехідних процесів, що виникають в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами під час режимних та аварійних змінень пропускної потужності, відносяться до найбільш складних у сучасній електротехніці. Вони додатково ускладнюються при наявності міжфазних електромагнітних та ємнісних зв'язків, які, зокрема, виникають у сучасних потужних трифазних лініях електропередачі.

Суттєві наукові результати з досліджень перехідних електромагнітних процесів у розгалужених багатофазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками (якими є трифазні кабельні лінії електропередачі) отримали такі відомі вчені, як Уїді Б., Шидловський А.К., Щерба А.А., Подольцев О.Д., Резинкіна М.М., Кучерява І.М., Яндульський О.С., Кирик В.В, Баженов В.А., Денисенко Г.І., Лежнюк П.Д., Півняк Г.Г., Ларина Е.Т., Крумм Л.А., Перхач В.С., Костенко М.В., Перельман Л.С., Базуткін В.В., Домоховська Л.Ф., Левінштейн М.Л., Wedepohl L.M. , Welcox D.J., Anderson R. J, Nagoaka N., Heaton A.G. та інші.

Аналіз чисельних досліджень показав, що найбільш доцільним при вирішенні дослідницьких задач такого типу є розвиток теорії багатополосників та чисельних методів математичного моделювання, реалізованих у відомих прикладних програмах. Це суттєво спрощує як проведення чисельних розрахункових досліджень, так і отримання узагальнюючих результатів. Проте тривалий час використанню такого підходу в дослідженнях перехідних електромагнітних процесів у багатофазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками до недавнього часу приділялося недостатньо уваги.

Зазвичай кабельні лінії електропередачі, які є трифазними колами з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, представляли електричними колами із зосередженими параметрами, а при дослідженні перехідних електромагнітних процесів вводили поняття функції часу і просторових координат. В математичних моделях використовували диференціальні, інтегральні та різницеві рівняння, вирішення яких суттєво ускладнювалось при наявності різнорідних елементів (зосереджених і розподілених), а при необхідності врахування міжфазних взаємних індуктивностей і ємностей та порушенні симетричності режимів ставало практично неможливим.

Тому, тема даної дисертації, що спрямована на розвиток теорії багатополюсників у напрямку врахування міжфазних зв'язків у електричних колах з розподіленими параметрами для удосконалення методів розрахунку сталих і перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, що представлені багатополюсними елементами, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні наукові дослідження проводилися протягом 2010 – 2019 років на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно планів НДР НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» МОН України № 2349-п «Оптимізація нової технології промислового виготовлення кабелів з твердою полімерною ізоляцією для удосконалення енергетичних мереж надвисоких напруг» (№ ДР 0110U000269), НДР № 2536-п «Розробка науково-технічних засобів неруйнівної діагностики вітчизняних надвисоковольтних кабелів світового рівня для підвищення їх експлуатаційної надійності та ресурсу» (№ ДР 0112U002394), НДР № 2723-п

«Створення енергоефективної резонансної установки для сертифікаційних випробувань вітчизняних кабелів з сучасною ізоляцією на високі та надвисокі напруги» (№ ДР 0114U000580), НДР № 2908-п «Методи та засоби ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги» (№ ДР 0116U003716). У даних НДР автор був виконавцем наукових досліджень електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах (зокрема, у колах трифазних високовольтних кабельних ліній) з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками з використанням багатополюсних елементів.

**Мета і задачі наукових досліджень.** Метою дисертації є розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів.

Постановка такого наукового завдання обґрунтована сучасною тенденцією в теоретичній електротехніці розглядати багатофазні електричні кола як послідовно-паралельне з'єднання різних  $n$ -полюсників, що забезпечує підвищення ефективності розрахунку перехідних електромагнітних процесів в багатофазних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити такі задачі:

1. На підставі критичного аналізу відомих наукових публікацій обґрунтувати актуальність обраної теми дисертаційних досліджень.
2. Розвинути метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та

міжфазними зв'язками на основі представлення цих кіл багатополіусниками із зосередженими параметрами, знаходження їх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів при різних режимах підключення кіл до мережі електроживлення.

3. Удосконалити математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополіусників і врахування наведених ЕРС та індукованих струмів у екранах фазних кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє спрощувати визначення умов обмеження напруг і струмів у таких екранах.

4. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних колах типу довгих кабельних ліній електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначити особливості появи власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

5. Розробити рекомендації для обмеження індукованих напруг і струмів у струмопровідних екранах кабелів довгих трифазних ліній електропередачі, як в електричних колах із розподіленими параметрами та міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками.

6. Отримати науково-прикладні результати для удосконалення методик розрахунку перехідних процесів у трифазних кабельних лініях енергетичного призначення.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні процеси в електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

*Предмет дослідження* – розрахунок перехідних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та

міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополіусниками, що ураховують наявні міжфазні зв'язки та особливості їх підключення до трифазної мережі електроживлення.

**Методи дослідження.** При вирішені поставлених у роботі задач використовувались: наукові положення теорії аналізу і синтезу трифазних лінійних електричних кіл, методи теорії багатополіусників та їх використання для моделювання електромагнітних перехідних процесів в колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками, складання електричних схем заміщення із зосередженими параметрами для розрахунку електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях. Чисельне моделювання електромагнітних перехідних процесів реалізовано з використанням пакету прикладних програм Matlab.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополіусниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків.

2. Розроблено нову математичну модель розгалужених трифазних електричних кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками на основі складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, урахування взаємних наявних міжфазних зв'язків, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах.

3. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних кабельних лініях електропередачі як трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними

зв'язками, вперше визначено особливості виникнення в них власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

4. Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні перерізи екранів і необхідну кількість їх транспозицій.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична значимість отриманих результатів полягає в розробці інженерних методик для розрахунку і аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних колах з взаємними електромагнітними зв'язками, зокрема в кабельних лініях електропередачі.

Отримано такі результати:

На основі розвитку теорії багатополісників удосконалено методику розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних ЛЕП з урахуванням наведеної ЕРС взаємоіндукції між її ділянками з різними складовими елементами.

Розроблено рекомендації для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях як у розгалужених електричних колах з зосередженими параметрами, шляхом урахування особливостей взаємних електромагнітних зв'язків між їхніми ділянками з різними параметрами, що дозволяє визначити необхідні транспозиції екранів кабелю для реалізації допустимих напруг та струмів короткого замикання в кабельних лініях.

Розроблено нову методику розрахунку допустимих і аварійних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими

параметрами та міжфазними зв'язками, зокрема в трифазних кабельних лініях, що використовують транспозицію екранів кабелів.

Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розрахунку та аналізу перехідних процесів в високовольтних кабельних ЛЕП використано на заводі «Південкабель» (м. Харків) при розробці методично-керівних документів РД К28-006:2013 «Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожаробезопасности» та РД К28-007:2017 «Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения», Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ) та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримано автором особисто. В працях, опублікованих у співавторстві, автору належить у: роботах [1-3] – розробка математичної моделі для розрахунку та аналізу перехідних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі з різними з'єднаннями екранів; [4-5] – обґрунтування теорії багатополюсників для моделювання трифазних електричних кіл з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними та ємнісними зв'язками для дослідження перехідних процесів при різних комутаційних режимах; [6] – удосконалення методів обмеження комутаційних перенапруг для аналізу перехідних процесів у трифазних електричних колах з електромагнітними міжфазними зв'язками; [7-9] – аналіз електромагнітних перехідних процесів у трифазних



електричних колах із складними міжфазними зв'язками шляхом створення нових і поліпшення існуючих математичних моделей та методів розрахунку багатофазних ліній з розподіленими параметрами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались на міжнародних конференціях: МНТК молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики» (м. Київ, в 2012-2016 рр.), XVI Міжнародній конференції IEEE «International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)» (м. Львів, в 2015 р.), XVII МНТК «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчуг, в 2016 р.), МНТК «Inzynieria i technologia. Wspolczesne tendencje w nauce i edukacji» (Krakow, Poland, в 2016 р.), МНТК «Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje na rok 2016» (Zakopane, Poland, в 2016 р.), Міжнародній конференції IEEE «Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)» (м. Київ, в 2017 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено в 22 наукових працях: 9 статей у фахових виданнях України (з них 4 – у виданнях, які входять до міжнародних науково метричних баз даних), 13 тез доповідей в збірниках міжнародних науково технічних конференціях.

## РОЗДІЛ 1

### МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РОЗГАЛУДЖЕНИХ КІЛ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА МІЖФАЗНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Розрахунок та прогнозування перехідних електромагнітних процесів являє собою не просту задачу. Перехідні процеси, які протікають в багатофазних електричних колах з зосередженими та розподіленими параметрами потребують поглибленого дослідження. Крім того, ця задача є статичною, що потребує розгляду великої кількості варіантів, в яких змінюються різні фактори та їх сполучення. Розгляд таких задач та доведення їх до технічного рішення не завжди представляється можливим без використання сучасних обчислювальних засобів. Використання комп'ютерного моделювання являє собою розуміння та тлумачення результатів, які можуть бути отримані, якщо попередньо вирішити задачу у спрощеній формі, що дозволяє довести її до аналітичного рішення [1-22].

#### **1.1 Принципи моделювання електромагнітних процесів у багатофазних електричних колах**

При моделюванні та аналізі складного багатофазного електричного кола використовується сукупність алгоритмів і програмних прийомів, в яких електричне коло представляється сукупністю багатополісників, виводи яких, звані вітками електричного кола, з'єднані у вузлах. Віткам електричного кола з номерами 1, 2, ..., ставиться у відповідність вектор струмів  $\mathbf{i}^T = (i_1, i_2, i_M)$ , вузлам електричного кола з номерами 0, 1, ...,  $N$  – вектор потенціалів  $\mathbf{u}^T = (u_1, u_2, u_N)$ . Вектор  $\mathbf{V} = (\mathbf{u}, \mathbf{i})$  називається вектором

змінних електричного кола або координатного базису. Сума  $L = M+N+1$  визначається розмірністю цього електричного кола.

Математичною моделлю компонента електричного кола є незамкнута система рівнянь, що пов'язує змінні на виводах цього компонента. Математична модель електричного кола являє собою замкнуту систему рівнянь, які задають топологічний закон, і співвідношень математичних моделей компонентів електричного кола. Завдання моделювання електричного кола полягає в зведенні всіх рівнянь в одну систему, завдання аналізу – у визначенні вектора змінних електричного кола.

При такому підході в якості топологічного закону вибирається закон Кірхгофа для струмів. Відомо, що сукупність законів Кірхгофа для всіх вузлів утворює лінійно-залежну систему, тому закон Кірхгофа для струмів застосовується для всіх вузлів, крім нульового. У загальному випадку номер цього вузла не грає ролі. В якості точки відліку для напруг вибирається нульовий вузол, потенціал якого прирівнюється до нуля. Тоді математична модель електричного кола представляється системою рівнянь:

$$\begin{aligned} u_0 &= 0, \\ [A] \cdot i &= 0, \\ F\left(\frac{du}{dt}, \frac{di}{dt}, u, i, t\right) &= 0 \end{aligned} \tag{1.1}$$

де  $[A]$  – матриця інцидентності, що має розмірність  $M \times N$ .

Рівняння, що визначають математичні моделі компонентів електричного кола, в загальному випадку є нелінійними диференціальними і алгебраїчними рівняннями. Дискретизація звичайних диференціальних рівнянь здійснюється неявними методами Ейлера або трапецій. Лінеаризована система рівнянь складається для кожного компонента електричного кола і пов'язує змінні  $u$  та  $i$  на виводах тільки цього

компонента. Часткові похідні, які є елементами матриці Якобі, розраховуються за аналітичними виразами, які вибираються з математичної моделі компонентів електричного кола. Початковим наближенням вектора рішень служить його значення на попередньому кроці за часом, що забезпечує збіжність ітераційного процесу з квадратичною швидкістю.

Дискретна форма системи (1.1) має вигляд:

$$\begin{aligned} u_0^{m+1} &= 0, \\ [A] \cdot i^{m+1} &= 0, \\ [B^n] \cdot u^{n+1} + [C^n] \cdot i^{n+1} &= D^n \end{aligned} \quad (1.2)$$

де  $[B^n]$ ,  $[C^n]$ ,  $D^n$  – параметричні матриці і вектори відповідно.

Багатофазні кола характеризуються наявністю електромагнітних і електростатичних взаємозв'язків між елементами окремих фаз компонентів електричного кола. Дискретна математична модель такого багатополюсного компонента може бути представлена в формі

$$u^{n+1} + [C^n] \cdot i^{n+1} = D^n \quad (1.3)$$

має симетричну матрицю  $[C^n]$  з ненульовими діагональними і недіагональними членами. Якщо діагоналізувати матрицю  $[C^n]$ , то система (1.3) може бути представлена сукупністю незалежних рівнянь.

Діагоналізація матриць пов'язана з проблемою знаходження власних значень [16]. Діагональна матриця є матрицею власних значень вихідної матриці, а матриця перетворення буде матрицею власних векторів. Позначаючи матрицю відповідного лінійного перетворення через  $[\Lambda]$ , можна систему (1.3) представити як систему незалежних рівнянь:

$$\tilde{u}^{n+1} + [\tilde{C}^n] \cdot \tilde{i}^{n+1} + \tilde{D}^n \quad (1.4)$$

де зв'язок перетворених змінних з фазними представляється співвідношеннями

$$\tilde{u}^{n+1} = [\Lambda]^{-1} \cdot u^{n+1}, \quad \tilde{i}^{n+1} = [\Lambda]^{-1} \cdot i^{n+1} \quad (1.5)$$

а діагональна матриця  $[\tilde{C}^n]$  визначається виразом

$$[\tilde{C}^n] = [\Lambda]^{-1} \cdot [C^n] [\Lambda] \quad (1.6)$$

Таким чином, багатополюсний компонент електричного кола, математична модель якого (1.3) являє собою взаємозалежну систему рівнянь щодо змінних кола в фазових координатах, можна замінити на сукупність двополюсних компонентів, математичні моделі яких в перетворених системах координат є незалежними один від одного рівняннями (1.4), і додаткових багатополюсних компонентів, що описуються рівняннями (1.5). Аналіз електричного кола, що включає такі компоненти проводиться в розширеному координатному базисі

$$V = (u), \tilde{u}, i, \tilde{i}$$

що збільшує розмірність електричного кола. Однак за допомогою обмеженого набору базових компонентів перетворювачі дозволяють формувати схеми вихідних багатополюсників і включати компоненти, математичний опис яких найбільш раціональний у відмінній від фазової системі координат.

При розрахунку перехідних електромагнітних процесів в трифазних електричних колах використовують фазові  $(A, B, C)$  – координати, модальні  $(\alpha, \beta, 0)$  – координати і обертові  $(d, q, 0)$  – координати.

Інформація про топології, компонентний склад електричного кола і значення параметрів може задаватися компонентами підпрограм із зазначенням номерів віток і вузлів компонента, а також їх параметричних даних. У матричній формі система (1.2) має вигляд

$$[F] \cdot V = W \quad (1.7)$$

Для схем, що містять складні математичні моделі з високим взаємозв'язком між елементами (наприклад, взаємоіндуктивний зв'язок), матриця  $[F]$  може здаватися в повному вигляді.

Модельний метод є різновидом топологічних методів аналізу схем, до числа яких належать методи контурних струмів, вузлових потенціалів, змінних стану. Їх відмінність визначається вибором координатного базису. Розмірність електричного кола  $L$  в модельному методі перевершує розмірність координатного базису в таких методах, як метод вузлових потенціалів або змінних стану. Відповідно швидкість розрахунку при цьому знижується. Однак перевагами модельного методу є: відсутність обмежень на вид компонентів електричного кола (дво- і багатополюсні, лінійні і нелінійні, керовані струмом і напругою); простота моделювання електричного кола внаслідок використання закону Кірхгофа для струмів, застосування якого не вимагає понять замкнутого контуру і падіння напруги на ділянці кола; алгоритмічна простота математичних моделей компонентів електричного кола, яка полягає в заповненні матриці  $[F]$  і вектора  $W$  даними згідно топології і параметрів лінеаризованих рівнянь.

Для аналізу електричних схем, які складаються з довгих ліній, використовується метод хвильових каналів [16]. Наявність перетворювача координат та однофазної (одноканальної) лінії дозволяє проводити розрахунки перехідних процесів у багатопровідних лініях, які складаються з будь-якої кількості фазних проводів. В окремому випадку трифазна симетрична лінія представлена перетвореною із фазових ( $A, B, C$ ) – координат у модальні ( $\alpha, \beta, 0$ ) та системою із трьох одноканальних ліній з параметрами по прямій та нульовій послідовностями [23].

## 1.2 Методи розрахунку перехідних електромагнітних процесів у електричних колах з розподіленими параметрами

Для аналізу перехідних процесів в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами використовуються різні методи представлені на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 Методи дослідження електромагнітних перехідних процесів

Аналіз цих методів показує що: експериментальний підхід, базується на моніторингу і спостереженнями перенапруг які виникають в кабельних лініях електропередачі [24, 25]. Наведені методи характерні для різних способів підбору захисних пристроїв і моніторингу рівня ізоляції. Але вони не враховують тривалість, амплітуду перенапруги при різних комутаційних режимах.

Розглянемо метод фізичного моделювання [26, 51, 52], який має обмеження для кабельних ліній високої напруги. Він дозволяє досить точно аналізувати процеси в натурних моделях кабельних ліній і досліджувати

фізичні явища які відбуваються в кабелі. Однак виникає ряд труднощів, які пов'язані з реалізацією натурних моделей на практиці, які пов'язані з технічними умовами і фінансовими затратами.

Метод математичного моделювання [26, 27, 53] полягає в реалізації схеми заміщення трифазного кабельної лінії при відомих параметрах, що обмежує його застосування.

Статистичний метод [28, 54], ґрунтується на статистичному плануванні та обробці великої кількості експериментів і розробки рекомендацій щодо оцінки перенапруг і вибору захисту від їх наслідків. Однак не завжди можливо сформулювати необхідні статистичні масиви.

Розрахунково-статистичний метод [29, 55, 56], при використанні якого кабельна лінія є однорідною довгою лінією або ланцюгової схемою, а параметри схеми заміщення обчислюються простими інженерними формулами. Так само, сюди можна віднести статистичні параметри перенапруг, що виникають в математичних експериментах, при багаторазових розрахунках режимів в математичних моделях системи, з урахуванням різних значень параметрів і комутацій [30, 31, 57].

У розрахункових методах, які базуються на дослідженні математичної моделі трифазного кола з розподіленими параметрами, у всіх випадках коефіцієнти, які входять в рівняння, визначаються параметрами схеми заміщення, які знаходяться або експериментально або шляхом розрахунку конструктивних даних, що не завжди можливо.

Частотний метод [32, 33, 58] ґрунтується на тому, що при його застосуванні, в схемі заміщення кола складають вираз передатної функції і потім (через інтеграл Фур'є) будуються вирази для напруг і струмів в перехідному режимі. Для практичного обчислення інтеграла Фур'є необхідно



знати залежності параметрів в широкому діапазоні частот, починаючи від  $\omega=0$  [1, 2].

Метод Фур'є (тобто стоячих хвиль) [34, 59], передбачає використання рішення у вигляді нескінченної суми гармонік – стоячих хвиль. Недоліком методу є отримання при вирішенні ортогональних власних функцій [35], в наслідок чого неможливо визначити коефіцієнти Фур'є незалежно один від одного. Так як початкові функції напруги та струму, які задовольняють докুমутаційним граничним умовам, розкладаються в ряди за власними функціями, що задовольняє післякомутаційним граничним умовам. Практичне обчислення при наявності такого явища [36] вдається виконати підсумовуванням рядів середнім арифметичним або методом множників Ланцоша [37, 38]. Перевагою методу є порівняно швидкого визначення спектра власних частот системи, значення якого необхідно для подальшого обчислення амплітуди перенапруг.

При використанні методу Фур'є для розрахунку перехідних процесів досить мати значення дискретного спектра власних частот і значення хвильових параметрів системи на цих частотах.

Зокрема метод Даламбера (біжучих хвиль) [39, 40]. Даний метод відображає фізичний зміст перехідних процесів в колах з розподіленими параметрами. Застосування цього методу використовується, як правило, для ліній без втрат і для неспотворювальних ліній. В інших випадках форма хвилі, що розповсюджується сильно спотворюється при переміщенні. У цих випадках переходять до розрахунку у модальних каналах, для кожного з яких характерна своя швидкість поширення, що дозволяє враховувати залежність хвильових параметрів лінії від частоти. Цим методом можна розраховувати амплітуду перенапруг при першому пробігу хвилі, так як при врахуванні

відбитих і заломлених хвиль призводить до ускладнення алгоритмів і збільшення обсягу обчислень.

Загальним недоліком методів [41–44, 60] чисельного інтегрування [45], є складність поетапного аналізу отриманих результатів і об'ємна постановка вихідних даних у завданнях програмування. При наявності коливального характеру процесів, що розглядаються ці методи виявляються нестійкими [46].

Метод кінцевих елементів дозволяє розбивати області інтегрування на однакові зі спрощеними властивостями кінцеві елементи [47]. У розглянутих задачах метод кінцевих елементів за своїм фізичним змістом відповідає представленням лінії ланцюговою схемою. Так само, до чисельних методів відносяться: метод кінцевих різниць [48] і метод Z перетворення [49], які дозволяють побудувати оригінал і не вимагають визначення коренів (власних частот), шляхом заміни точного зображення функції напруги та струму імпульсним.

Операторний метод [50, 51] є найбільш ефективним методом отримання рішень, так як при його використанні не потрібно враховувати послідовне отримання коефіцієнтів рядів, і тому точність цього методу не залежить від ортогональності власних функцій.

Рішення даним методом, можна представити у вигляді прямої та зворотної хвиль. Для отримання оригіналу по теоремі розкладання необхідно визначати спектр власних частот. При вирішенні завдань потрібна обов'язкова запис всього зображення, що призводить до збільшення обсягу розрахункових даних. Операторний метод дозволяє автоматично враховувати початкові і граничні умови.

З огляду методів дослідження електромагнітних перехідних процесів, зроблено висновок, що для розрахунків перехідних напруг і струмів у

багатофазних електричних колах, найбільш доцільним є використання розрахункових методів. Ці методи дозволяють підвищити точність результатів розрахунку перехідних процесів, що потребує в ряді практичних випадків відмовитися від припущень симетрії лінії та перейти до розробки методів розрахунку перехідних процесів в несиметричних режимах.

### **1.3 Узагальнений підхід до моделювання трифазних кіл з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками**

При аналізі динамічних процесів в електричних колах з зосередженими та розподіленими параметрами значну увагу приділяється вибору математичної моделі, яка найкращим чином відповідає поставленим вимогам.

Струми і напруги в колах з розподіленими параметрами є функціями двох незалежних змінних – часу  $t$  і просторової координати  $x$ . Відповідно рівняння, що описують процеси в колах з розподіленими параметрами, можна представити у вигляді рівнянь в частинних похідних [1–5]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} = 0\end{aligned}\tag{1.8}$$

де  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $G_0$ ,  $C_0$  – погонні первинні параметри, віднесені на одиницю довжини.

Фрагменти електричного кола з зосередженими параметрами, що описуються звичайними диференціальними рівняннями, можуть в свою чергу представляти собою багатоелементні кола, що мають досить складну структуру. Таким чином, математичний опис такого кола з різномірними

елементами об'єднує дві групи диференціальних рівнянь – в частинних похідних типу (1.8) і групи звичайних диференціальних рівнянь.

При розробці математичної моделі перехідних електромагнітних процесів зазвичай застосовують зведення системи рівнянь в частинних похідних до системи диференціальних рівнянь у повних похідних. При такому підході лінія з розподіленими параметрами заміщається ланцюговою схемою заміщення, число ланок якої визначається необхідною точністю рішення. В результаті будується математична модель у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь, яка в подальшому вирішується будь-яким чисельним або чисельно-аналітичним методом.

Складність в отриманні математичної моделі кола з різнорідними елементами полягає в тому, що фрагменти кола, описуються різними типами рівнянь, розраховуються окремо - специфічними для кожного типу рівнянь методами і з подальшим погодженням рішень для окремих фрагментів кола. Для вирішення системи звичайних диференціальних рівнянь, використовується один з численних або чисельно-аналітичних методів. Для аналізу фрагментів кола з розподіленими параметрами можуть бути використані або класичні методи розрахунку довгих ліній, або один з кінцево-різницевих методів рішення рівнянь в частинних похідних. Традиційно використовувані класичні методи дослідження електричних кіл з розподіленими параметрами складають два основні класи: методи, засновані на хвильовому поданні рішення (хвильові методи) і методи, що не враховують хвильовий характер процесів в лінії [61, 62]. Обидва ці підходи мають свої позитивні і негативні сторони. Так, хвильові методи (наприклад, методи характеристик, біжучих хвиль) добре уявляють фізичну природу перехідного процесу, але не дозволяють розглянути його на досить тривалому інтервалі часу. Хвильові методи не дають можливості представити

рішення в аналітичній формі на певному інтервалі. Методи, які не враховують хвильової характер (наприклад, метод стоячих хвиль), дозволяють представити аналітично або чисельно-аналітично перехідний процес в лінії, не розглядаючи поширення хвиль. Крім того, обидва підходи, вимагають суттєвого спрощення вихідних даних, (наприклад, за рахунок заміни реальної лінії неспотворювальною лінією або лінією без втрат) [63].

Проблема узгодження розрахунків ділянок електричного кола з зосередженими та розподіленими параметрами може бути вирішена різними способами. Наприклад, послідовним переходом від фрагмента до фрагмента кола при покроковому вирішенні, чи організацією паралельних обчислень при використанні діакоптичного підходу.

Узгодження рішень для різнорідних ділянок кола являє собою досить складну задачу, та не завжди має рішення. При формуванні моделі різнорідного електричного кола потрібно використовувати однаковий математичний опис її елементів. Елементи електричного кола, що розглядаються як багатополюсники, можуть бути як лініями з розподіленими параметрами, так і ділянками кола з зосередженими елементами. Залежність між вхідними  $u(t)$  і вихідними  $i(t)$  величинами багатополюсників в цьому випадку є інтегральними операторами, перехідні провідності яких  $g(t-\tau)$  повністю визначаються внутрішніми властивостями елементів системи:

$$i(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t g(t-\tau)u(\tau)d\tau \quad (1.9)$$

У класичній теорії електричних кіл такий підхід застосовується до кола із зосередженими параметрами, який відомий як метод інтеграла Дюамеля [61, 62, 63]. Застосування інтегродиференціальних рівнянь (1.9) до опису елементів кола дозволяє отримати математичну модель у вигляді системи

інтегральних рівнянь, що описує перехідні процеси в колах, що містять як елементи з зосередженими, так і розподіленими параметрами.

У разі, якщо схема ділянки кола є досить складною, то перехідні провідності його можуть визначатися через перехідні провідності окремих його частин [64]. Власна і взаємна перехідні провідності лінії з розподіленими параметрами можуть бути отримані через перехідні провідності нескінченно довгих ліній. При цьому вони виражаються через порівняно прості і добре вивчені трансцендентні функції. Перехідні провідності ліній є носіями інформації про хвильовий характер процесу, природним чином відображаючи фізичні особливості перехідного процесу, властиві кола з розподіленими параметрами.

Застосування інтегральних рівнянь для аналізу динамічних режимів дозволяє вирішити проблему різнорідності математичного опису різних елементів, що входять в електричне коло, оскільки в цьому випадку елементи з зосередженими та розподіленими параметрами описуються однаково.

Використання переходу від лінії з розподіленими параметрами до ланцюгових схем заміщення має низку істотних переваг. Так як елементи з різними властивостями описуються одноманітно, пропонується підхід дозволяє побудувати єдині чисельні схеми для аналізу об'єктів, що містять відрізки довгих ліній і фрагменти кола з зосередженими параметрами [65–67].

#### **1.4 Особливості дослідження перехідних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі високої напруги**

Явно вираженими колами з розподіленими параметрами є трифазні кабельні лінії (КЛ) електропередачі. Багаторічні дослідження на кафедрі

теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інститут електродинаміки НАН України і заводу Південкабель, показали, що для прийняття оптимальних рішень, які забезпечують економічність і високу експлуатаційну надійність КЛ. Для цього необхідно по можливості враховувати найбільшу кількість факторів (часом взаємовиключні один одного), які дозволять реалізувати максимальну надійність, пропускну здатність і ресурс таких ліній.

Однак відносно висока вартість сучасних кабелів зі зшитою поліетиленовою (СПЕ) ізоляцією вимагає вибору оптимальної конструкції КЛ, а так само системного підходу для даних умов експлуатації, при якому необхідно по можливості врахувати всі чинники, що впливають на економічність, експлуатаційну надійність, а в ряді випадків і екологічність КЛ [68–85]. Оскільки ці фактори взаємозалежні (іноді з негативним зворотнім зв'язком), то поряд з оптимальним вибором конструкції кабелю (адаптованого до конкретного проекту) для прийняття раціональних проектних рішень слід знаходити певний компроміс між окремими факторами.

В процесі експлуатації ізоляційна конструкція кабелів з СПЕ ізоляцією піддається не тільки впливу електричного поля промислової частоти і високочастотних перенапруг, а й теплового поля і електромеханічних сил, що виникають в нормальному режимі і режимах перевантаження.

Високий попит на кабелі надвисокої напруги (НВН) визначив актуальність наукових досліджень щодо вдосконалення конструкції кабелів НВН для задоволення зростаючих вимог споживачів. Особливо це вдалося українському заводу «Південкабель» (м.Харків) освоїв промислове виробництво НВН кабелів світового рівня.

Удосконалення і виготовлення кабельних ліній електропередачі на різні напруги (в т.ч. і надвисокої) викликає необхідність вирішення ряду наукових завдань, з яких можна виділити:

- підвищення безпеки і надійності КЛ за рахунок визначення умов, які запобігають виникненню в них недопустимих струмів і напруг при заданому рівні потужності, що передається;
- визначення умов забезпечення необхідної якості перехідних процесів в КЛ при виникненні і зникненні в них короточасних допустимих струмів і напруг;
- аналіз особливостей тривало згасаючих струмів і напруг, зокрема тривалих і квазіусталених перенапруг, джерелом яких є електроенергія, накопичена в КЛ.

Для зміцнення зв'язку локальних енергосистем з об'єднаною європейською, в даний час, все більш широко, застосовуються кабелі НВН. Для підвищення стійкості енергосистеми Великобританії в Лондоні і Нанторпе створено дві кабельні лінії загальною довжиною 125 км, пропускною спроможністю 1600 МВА на напругу 400 кВ.

У Берліні енергокомпанією Bewag побудована повітряно-кабельна лінія електропередачі 380 кВ, основним призначенням якої є створення надійної системи зовнішнього електропостачання центральної частини міста з урахуванням подальших перспектив розвитку міських кабельних мереж. Іншим призначенням кабельної електропередачі є посилення зв'язку 380 кВ району Берліна з основною мережею енергосистем країн Центральної Європи, оскільки споруджена лінія є елементом цієї мережі.

Існуюча електрична мережа центральної частини Сіднея вже не в змозі забезпечити покриття навантажень з дотриманням необхідної надійності.



Тому було побудовано і введено у експлуатацію підстанцію Хеймаркет (3 x 400 МВА 330/132 кВ) і кабельну лінію 330 кВ яка живить цю підстанцію.

Параметри найбільших кабельних об'єктів, споруджених в останні роки, наведені в таблиці 1.1 [86, 87].

Удосконалення конструкції і технології виготовлення дозволило створити досконаліші кабелі традиційного типу і активно вести нові розробки. Так, в даний час європейськими виробниками кабельної продукції розроблені, випробувані і створені промислові зразки кабелю НВН рекордної пропускної здатності напругою:

- до 1000 кВ, маслонаполненого, з поперечним перерізом струмоведучих частини 2500 мм<sup>2</sup>, що має пропускну здатність 3 млн. КВт;
- до 550 кВ з ізоляцією із зшитого поліетилену (XLPE) з поперечним перерізом струмоведучих частини 2500 мм<sup>2</sup>, що має пропускну здатність 1,9 млн. КВт.

В Україні вже створені кабельну ЛЕП надвисокої напруги 330 кВ [71], яка забезпечує безперервність роботи електросталеплавильного виробництва.

У той же час проектування кабельних ЛЕП надвисокої напруги вимагає виконання великого обсягу попередніх науково-технічних напрацювань, електротехнічних розрахунків, розробки спеціальних технічних рішень, які стосуються питань проходження траси лінії, конструкцій елементів кабельної споруди і т.д. Так само слід дотримуватися електротехнічних розрахунків за вибором поперечного перетину струмоведучих жил кабелю для забезпечення необхідної пропускної спроможності КЛ, втрат напруги в КЛ, допустимість тривалих навантажень за умовою нагріву кабелю в нормальному і аварійному режимах, параметрів заземлюючих пристроїв і т.д.

Таблиця 1.1 – Діючі світові високовольтні кабельні лінії  
електропередачі [86]

Країна, назва проекту	Кількість ліній, напруга, тип ізоляції кабелю, переріз	Вид прокладки кабелю	Протяжність, км (в однофазному обчисленні)
1	2	3	4
Данія, Орхус- Ольборг (Aarhus-Aalborg)	2 x 400 кВ, XLPE, 1 x 2000 мм <sup>2</sup>	у землі	84
США, Сан-Хосе (Sun Jose)	2 x 230 кВ, XLPE, 1 x 1267 мм <sup>2</sup>	у трубах	57
Великобританія, Нанторп (Nunthorpe)	1 x 420 кВ, XLPE, 1 x 2000 мм <sup>2</sup>	у землі	65
Великобританія, Лондон (London)	2 x 420 кВ, XLPE, 1 x 2500 мм <sup>2</sup>	у тунелі	60
Іспанія, Мадрид (Madrid)	2 x 400 кВ, XLPE, 1 x 2500 мм <sup>2</sup>	у тунелі	72
Сингапур (Republic of Singapore)	1 x 400 кВ, PPL, 1 x 2000 мм <sup>2</sup>	у землі	51
Німеччина, Берлін (Berlin)	2 x 400 кВ, XLPE, 1 x 1600 мм <sup>2</sup>	в глибокому тунелі	75
Арабські Емірати, Абу Дабі (Abu Dhabi)	2 x 400 кВ, XLPE, 1 x 800 мм <sup>2</sup>	в глибокому тунелі	16
Катар (Qatar)	2 x 400 кВ, XLPE, 1 x 1600 мм <sup>2</sup>		141
Данія, Копенгаген (Copenhagen)	1 x 420 кВ, XLPE, 1 x 1600 мм <sup>2</sup>		104
Китай, Гуанджоу (Guangzhou)	1 x 500 кВ, масло наповнена ізоляція, 800 мм <sup>2</sup> , 1600 мм <sup>2</sup>	тунель, перепад висот 200 м	3 4

Економічність, експлуатаційна надійність і фактичний термін служби кабелю з СПЕ ізоляції залежать від теплового режиму експлуатації кабелів, який визначається способом прокладки кабелів, схемою заземлення екранів, наявністю або відсутністю транспозиції екранів.

Наявні публікації з моделювання та аналізу перехідних процесів, що виникають в кабельних ліній електропередачі [24–30], не досить повно описують особливості їх виникнення. Отримані моделі в основному призначені для аналізу тільки діючих значень струмів і напруг усталеного режиму [36–40], що не дозволяє аналізувати і вивчати перехідні явища при різних комутаціях. Крім того, найчастіше розрахунок поздовжньої і поперечної несиметрії, ведеться в базисі симетричних складових, де в силу припущень, багато факторів не враховуються.

Завдання розрахунку перехідних процесів в трифазних кабельних лініях електропередачі ускладнюється відсутністю доступних методик її вирішення, що враховують особливості силових комутацій. В даний час рішення, завдання розрахунку перехідних процесів в КЛ доцільно здійснювати із застосуванням програмних і програмно-апаратних комплексів, типу Matlab/Simulink, PS-CAD, COMSOL Multiphysics і інші. При моделюванні КЛ зазвичай використовують прості схеми заміщення, оскільки завдання розрахунку перехідних процесів вимагають адаптації наявних пакетів прикладних програм. Найчастіше завдання моделювання кабельних ліній надвисокої напруги зводиться до розрахунку усталеного режиму для визначення рівня напруги, і втрат електроенергії [40–43].

У вітчизняній і зарубіжній літературі наведено моделі окремих елементів кабельних ліній [44–46], які зазвичай, розглядаються як кабелі в одно- або в трифазному виконанні без урахування взаємних індуктивностей і

ємностей між провідниками, що не дає точних результатів і не дозволяє в повній мірі аналізувати процеси, що відбуваються.

У той же час перехідні режими КЛ обумовлені комутацією навантажень і аварійними режимами. Наявність взаємоіндукції і ємностей між проводами фаз призводить до ускладнення розрахунків, що призводить до складності при аналітичному описанні [47–49]. Широко застосовуються на практиці методи розрахунку перехідних процесів в кабельних ЛЕП не дозволяють з достатньою точністю отримати форми кривих струму і напруги перехідних процесів при складних видах комутацій і проявів нелінійності.

Зазвичай при розрахунках перехідних процесів ведеться або якісний, або кількісний аналіз параметрів процесу, таких, як чинне значення струмів і напруг, симетричних складових, гармонічних складових сигналів струму і напруги, і не розглядається вся картина перехідного процесу в цілому, з урахуванням взаємного впливу фаз один на одного [50–53].

Вивченню електромагнітних перехідних процесів в кабельних лініях присвячені роботи [54–60], в яких розглядаються вирішення завдань забезпечення надійності об'єктів на стадії проектування. Рішення таких завдань, пов'язане з дослідженням перехідних процесів в трифазних колах з розподіленим параметрами, що виникають при експлуатаційних і аварійних комутаціях.

Комутаційне перенапруги – небезпечне явище, що приводить до руйнування обладнання, небезпеки для обслуговуючого персоналу та економічних втрат. Вони надають поступову руйнівну дію на ізоляцію кабелю [24–30]. Необхідність забезпечення високої якості роботи кабельної лінії електропередачі вимагає вжиття заходів щодо обмеження комутаційних перенапруг [65–40].

Необхідність передбачати можливі рівні комутаційних перенапруг особливо підкреслюється в роботах [26–38, 68–87], в яких підкреслюються труднощі, що виникають при використанні спроектованих КЛ, аж до повної неможливості забезпечення її надійної експлуатації. Велика кількість робіт присвячено також експериментальному вивченню комутаційних перенапруг в кабельних ліній [28–36, 52–54]. Є багато теоретичних робіт [56–70] в розрахунках яких використовується експериментальні частотні характеристики системи, що підвищує точність, але не дозволяє досліджувати об'єкт на стадії його проектування.

При вивченні та аналізі кривих перенапруг особливо складними є завдання визначення характеристик перехідного процесу (кратності, крутизни фронту, частотного спектра), а також геометричних параметрів проекрованої лінії [24–28, 32, 34, 53–76].

Таким чином, незважаючи на значні успіхи в теоретичних і експериментальних дослідженнях, особливо актуальною є наукова задача розрахунку перехідних процесів трифазних ланцюгів з розподіленими параметрами.

Такі дослідження зручніше виконувати на математичних моделях перехідних процесів в трифазних електричних колах, які в подальшому дають можливість інтегрувати отримані розрахункові моделі в пакети комп'ютерних прикладних програм, таких як Matlab/Simulink.

### **1.5 Висновки до розділу 1**

1. На підставі аналізу відомих спеціалізованих публікацій науково обґрунтовано необхідність удосконалити методи аналізу усталених і перехідних процесів в трифазних кабельних ліній електропередачі та їх математичних моделей, на основі розвитку теорії багатополісників в

напрямку урахування міжфазних взаємоіндуктивних зв'язків в кабельних лініях.

2. З аналізу відомих методів дослідження електромагнітних перехідних процесів в електричних колах з розподіленими параметрами типу довгих кабельних ліній, найбільш доцільним є застосування класичного і операторного методів і теорії багатополісників. Зручність даних методів полягає в можливості автоматичного обліку початкових і граничних умов. Але при вирішенні такого класу задач потрібна обов'язкова запис всього зображення, що призводить до збільшення обсягу розрахункових даних.

3. При моделюванні електричних кіл, з яких складаються КЛ, що містить різноманітні елементи – як з зосередженими, так і розподіленими параметрами – виникає необхідність вибору форми моделі, методів аналізу, адаптованих до обраної моделі, і побудови чисельної процедури комп'ютерної реалізації методу.

4. Використання теорії багатополісників дозволяє представляти елементи електричного кола макромоделями, що відображають їх зовнішні зв'язки і вплив на іншу частину кола. Основна складність застосування такого принципу полягає в розв'язці виникаючих електромагнітних зв'язків.

5. Незважаючи на значні успіхи в теоретичних і експериментальних дослідженнях, розрахунок і аналізу перехідних процесів у трифазних колах з розподіленими і зосередженими параметрами залишаються актуальними. Такі дослідження зручніше проводити на математичних моделях перехідних процесів в трифазних електричних колах, представлених ланцюговими схемами заміщення, ланки якої моделюються еквівалентними багатополісниками, що в подальшому дає можливість адаптувати отримані розрахункові моделі в пакети комп'ютерних прикладних програм.

Метою дисертації є розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополісниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів.

Постановка такого наукового завдання обґрунтована сучасною тенденцією в теоретичній електротехніці розглядати багатофазні електричні кола як послідовно-паралельне з'єднання різних  $n$ -полісників, що забезпечує підвищення ефективності розрахунку перехідних електромагнітних процесів в багатофазних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- на підставі критичного аналізу відомих спеціалізованих публікацій обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційних досліджень.

- розвинути метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками на основі представлення цих кіл багатополісниками із зосередженими параметрами, знаходження їх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів при різних режимах підключення кіл до мережі електроживлення.

- удосконалити математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників і врахування наведених ЕРС та індукованих струмів у екранах фазних кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє спрощувати визначення умов обмеження напруг і струмів у таких екранах.

– на основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних колах типу довгих кабельних ліній електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначити особливості появи власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

– розробити рекомендації для обмеження індукованих напруг і струмів у струмопровідних екранах кабелів довгих трифазних ліній електропередачі, як в електричних колах із розподіленими параметрами та міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками.

– отримати науково-прикладні результати для удосконалення методик розрахунку перехідних процесів у трифазних кабельних лініях енергетичного призначення.



## **РОЗДІЛ 2**

### **ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ТРИФАЗНИХ КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ**

Оснoву ширoких класів електричних кіл з розподіленими параметрами складають трифазні електричні кола з розподіленими параметрами типу високовольтих кабельних ліній електропередач. Саме перехідні і сталі процеси в таких колах визначають надійність і стійкість роботи енергосистеми.

У науково-технічній літературі приділяється велика увага теоретичному аналізу та інженерним методам розрахунку електромагнітних перехідних процесів в електричних колах з розподіленими параметрами.

Однак урахування розподілених параметрів та вплив взаємодукції однофазних кабелів трифазної лінії призводить до складності досліджуваного кола, посилення вимог до точності і швидкості їх розрахунку, а також складний характер самих процесів, які зумовлюють необхідність подальшого вдосконалення методів їх аналізу.

Використання класичної теорії електротехніки і точних аналітичних методів розрахунку перехідних процесів для складних кіл стає все більш проблематичним. Відомі наближені аналітичні методи мають, як правило, обмежену придатність і не в змозі охопити широкий спектр завдань пов'язаних з дослідженням і аналізом електромагнітних перехідних процесів.

Найбільш перспективними для таких цілей дослідження і аналізу є методи, повністю орієнтовані на застосування комп'ютера, тобто універсальні по відношенню до типів елементів і складності електричних кіл,

типу високовольтних кабельних ліній з отриманням зображень струмів і напруг для розрахунку і дослідження їх оригіналів.

При чисельному аналізі електромагнітних перехідних процесів в кабельних ліній, її основною математичною моделлю є диференціальні рівняння. Відомі загальні алгоритми формування цих рівнянь, які сумісні з багатьма чисельними методами та їх подальшими рішеннями.

Однак ці алгоритми досить складні (особливо при наявності в колі взаємоіндуктивних зв'язків), вимагають виконання невиправдано громіздких математичних перетворень, додаткової логічної обробки вихідних даних і результату.

Таким чином, в даному розділі, розглянуті основні принципи отримання перехідних функцій струмів та напруг для дослідження математичної моделі електромагнітних перехідних процесів в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами.

Розрахунок і аналіз електромагнітних перехідних процесів, в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами, зокрема кабельних лініях електропередачі, що виникають при виникненні комутації аварійних режимів, зазвичай зводяться до аналізу в них хвильових процесів [1–5, 24–42]. Для підвищення точності розрахунків і отримання не тільки якісних, а й кількісних результатів, зазвичай схеми заміщення ліній із зосередженими елементами замінюють ланцюговими схемами заміщення [43–56], і з розподіленими параметрами [57–87].

## **2.1 Хвильові процеси при виникненні імпульсного напруги в трифазній електричних колах з розподіленими параметрами**

Підвищення робочої напруги і збільшення довжини високовольтних КЛ робить все більш актуальною задачу обмеження в них комутаційних перенапруг. У проектній і дослідницькій практиці виникає необхідність уточнення розрахунків перенапруг і умов для їх обмеження.

Трифазна кабельна лінія, являє собою трифазну систему з трьох кабелів однофазного виконання. Первинні поздовжні параметри такої лінії (власні і взаємні індуктивності і активні опори) через проникнення електромагнітного поля в провідні середовища (жили, екрани і земля) є частотно-залежними. Тому від частоти будуть залежати і хвильові параметри КЛ: хвильовий опір, хвильова довжина і коефіцієнт загасання.

Моделювання хвильових процесів в однорідних КЛ може бути виконано аналітичними методами з застосуванням різних математичних перетворень і функцій. У разі неоднорідної лінії, що містить зону з пошкодженою ізоляцією, еквівалентні параметри яких відрізняються від параметрів неушкоджених ділянок лінії, найбільш загальним підходом до аналізу хвильових процесів в таких лініях є чисельне рішення системи хвильових рівнянь методом кінцевих елементів або кінцевих різниць.

Для вирішення завдань обмеження комутаційних перенапруг в типових схемах застосування високовольтних кабельних ліній необхідно оцінити ступінь загасання хвиль при їх пробігу по кабельній лінії електропередачі. Цю задачу зручно розглядати на прикладі поширення по КЛ прямокутного імпульсу напруги.

При дослідженні хвильових процесів в трифазних кабелях однофазного виконання, використовувались хвильові рівняння [1–5] щодо модальних складових струму і напруги. При цьому приймалось, що первинні фазні і міжфазні параметри рівні між собою. Для трифазних симетричних КЛ матриці перетворення по струму і напрузі збігаються між собою і не залежать

від параметрів КЛ. Модальними каналами при цьому є міжфазні- і нульовий канали, а в якості складових можуть бути прийняті  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $0$ – складові. При цьому матриці перетворення по напрузі ( $\lambda^{-1}$ ) і по струму ( $\delta^{-1}$ ) мають вигляд:

$$\lambda^{-1} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix}.$$

Зворотні перетворення приймають вигляд:

$$\lambda = \delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матриці постійних поширення хвиль по хвильовим каналах і хвильовим опорам цих каналів записуються у вигляді:

$$\gamma_{(s)}^2 = \begin{bmatrix} Z_1\beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1\beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0\beta_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$Z_{B(s)} = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_1/\beta_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_1/\beta_1} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{Z_0/\beta_0} \end{bmatrix}$$

де  $Z_1 = Z_\phi - Z_{\phi\phi}$ ;  $Z_0 = Z_\phi - 2Z_{\phi\phi}$ ;  $\beta_1 = \beta_\phi - \beta_{\phi\phi}$ ;  $\beta_0 = \beta_\phi + 2\beta_{\phi\phi}$ .

З виразу (2.1) випливає, що параметри першого каналу відповідають параметрам для прямої послідовності фаз, нульового каналу – для нульової послідовності фаз.

Ступінь загасання хвиль розглядався при їх пробігу по кабельній лінії на прикладі процесу поширення прямокутного імпульсу напруги. Такий імпульс може виникати на одній з фаз КЛ при короткому замиканні (КЗ) на лінії електропередачі. Якщо КЗ відбувається на максимумі робочої напруги, то при відносно невеликій тривалості розглянутих процесів через малу протяжність КЛ амплітуда хвилі може бути протягом всього процесу прийнята незмінною.

Проаналізуємо поширення імпульсу напруги в симетричній КЛ на прикладі двоканальної системи:  $\alpha$  -, 0- каналів. Розрахункова схема наведена на рис. 2.1.

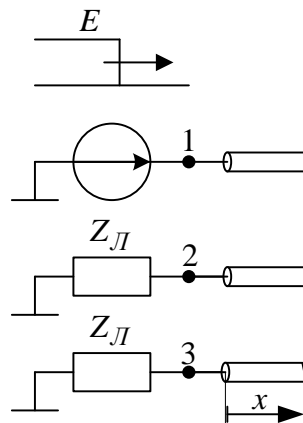


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема при дослідженні процесу поширення прямокутного імпульсу по кабельній лінії

Рівняння кабельної лінії нескінченної довжини, записані щодо  $\alpha$  -, 0 складових, мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{U}_\alpha(x), \frac{d^2 \dot{I}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{I}_\alpha(x) \\ \frac{d\dot{U}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{U}_0(x), \frac{d^2 \dot{I}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{I}_0(x) \end{cases} \quad (2.2)$$

Рішення рівнянь (2.2) будуть

$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x}, Z_\alpha \dot{I}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x} \\ \dot{U}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x}, Z_0 \dot{I}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x} \end{cases}$$

Граничні умови, при неврахування взаємного зв'язку між фазами високовольтної лінії записані наступним чином:

$$\dot{U}_1(0) = \frac{E}{p};$$

$$\dot{I}_2(0) = \frac{-\dot{U}_2(0)}{Z_{\mathcal{L}}};$$

$$\dot{I}_3(0) = \frac{-\dot{U}_3(0)}{Z_{\mathcal{L}}}$$

або

$$A_\alpha + A_0 = \frac{E}{p};$$

$$A_0 - \frac{A_\alpha}{2} = -Z_{\mathcal{L}} \left( \frac{A_0}{Z_0} - \frac{A_\alpha}{2Z_\alpha} \right).$$

Отже,

$$A_\alpha = \frac{E}{p} \left[ \frac{1 + Z_{\mathcal{L}} / Z_0}{1,5 + Z_{\mathcal{L}} / Z_\alpha + Z_{\mathcal{L}} / Z_0} \right];$$

$$A_0 = \frac{E}{2p} \left[ \frac{1 + Z_{\mathcal{L}} / Z_\alpha}{1,5 + Z_{\mathcal{L}} / 2Z_\alpha + Z_{\mathcal{L}} / Z_0} \right].$$

Ці постійні інтегрування так само, як і хвильові опори каналів КЛ, залежать від частоти (хвильовий опір лінії приймався частотно-залежним).

Оригінали, що відповідають  $\dot{U}_\alpha(x)$  та  $\dot{U}_0(x)$ , доцільно знаходити за допомогою частотного методу [4, 18, 88]:

$$u_i(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_i(x, \omega) \frac{\sin t \omega}{\omega} d\omega \quad (2.3)$$

де  $R_i(x, \omega) = \operatorname{Re} \left[ A_i(j\omega) e^{-\gamma_i(j\omega)x} \right] = |A_i(j\omega)| e^{-\alpha_i(\omega)x} \cos[\arg A_i(j\omega) - \beta_i(\omega)x]$ ;

$\gamma_i(\omega) = -\alpha(\omega) + j\beta(\omega)$ ;  $i = \alpha, 0$ .

Залежності діючих частин постійних поширення  $\alpha_i$  і швидкості поширення  $v_i = \omega / \beta_i(\omega)$  хвилі  $\alpha_i$  та 0-каналах від частоти показані на рис. 2.2.

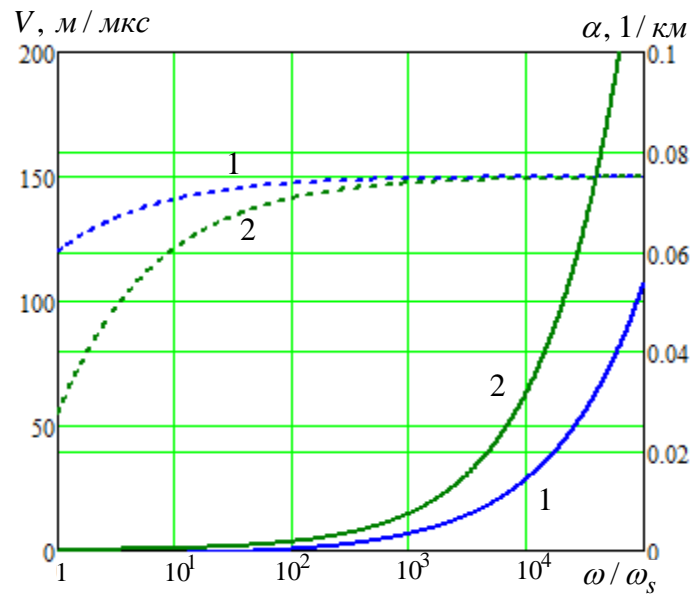


Рисунок 2. 3 – Залежність швидкостей поширення хвиль (пунктирні лінії) і коефіцієнтів загасання (суцільні лінії) в  $\alpha$ -каналі (1) та 0-каналі (2) кабельній лінії 330 кВ трифазного виконання

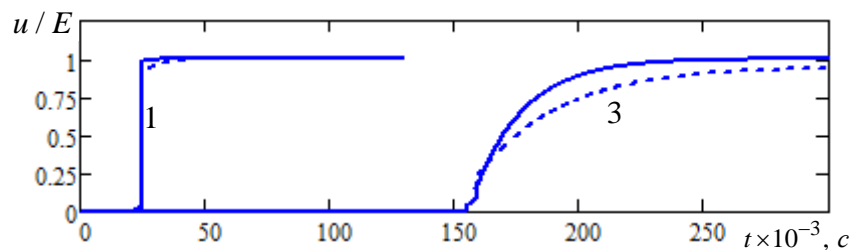


Рисунок 2.3 – Поширення прямокутного імпульсу по КЛ

– поширення  $\alpha$ -складової (суцільні лінії) і 0-складова (пунктирні лінії);

Обчислення інтегралу (2.3) виконувалось у прикладному пакеті MathCad за допомогою чисельного інтегрування Філона. На рис. 2.3 наведені форми імпульсів після пробігу хвилі 5 і 50 км по  $\alpha$ - та 0-каналах КЛ при впливі прямокутних одиничних хвиль. На рис. 2.4 показані форми імпульсів напруги на фазах в схемі рис. 2.1.

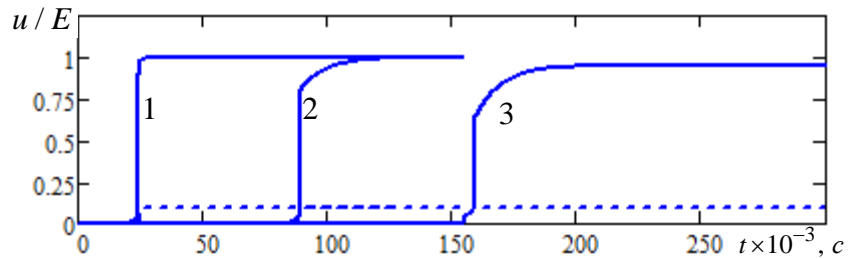


Рисунок 2.4 – Поширення прямокутного імпульсу по КЛ  
– поширення імпульсу по фазах КЛ (суцільні лінії – по фазі 1;  
пунктирні – по фазах 2 і 3);  
1 –  $x = 5$  км; 2 –  $x = 25$  км; 3 –  $x = 50$  км.

З рис. 2.4 та 2.4 видно, що характер спотворення хвиль  $\alpha$ - і 0-каналах кабелю розглянутого випадку приблизно однакові. Це пояснюється тим, що взаємний вплив фаз відносно малий, через близькість зворотного проводу (земля) до фазним струмопровідних жил кабелю.

Здійснений аналіз залежності характеристик хвильових каналів від частоти показує, що в першому наближенні дослідження перенапруг, що виникають на ізоляції провідник-екран, може проводитися при неврахуванні взаємовпливу фаз кабельної лінії. У свою чергу, перенапруги, що виникають на ізоляції екран-земля, повинні аналізуватися при обліку взаємного впливу процесів, що відбуваються в фазних колах екран-земля [89, 90].



## 2.2 Електричні схеми заміщення та рівняння кіл з розподіленими параметрами і взаємоіндуктивними зв'язками

Дослідження перехідних процесів в трифазних кабельних електричних колах являють собою не просту задачу, так як необхідно спільне рішення рівнянь Кірхгофа для струмів і напруг в жилах і екранах всіх трьох фаз.

На рисунку 2.5 представлена схема заміщення трифазного симетричного електричного кола з взаємно індуктивними зв'язками, ємнісним зв'язком між фазами і діелектричними втратами в ізоляції.

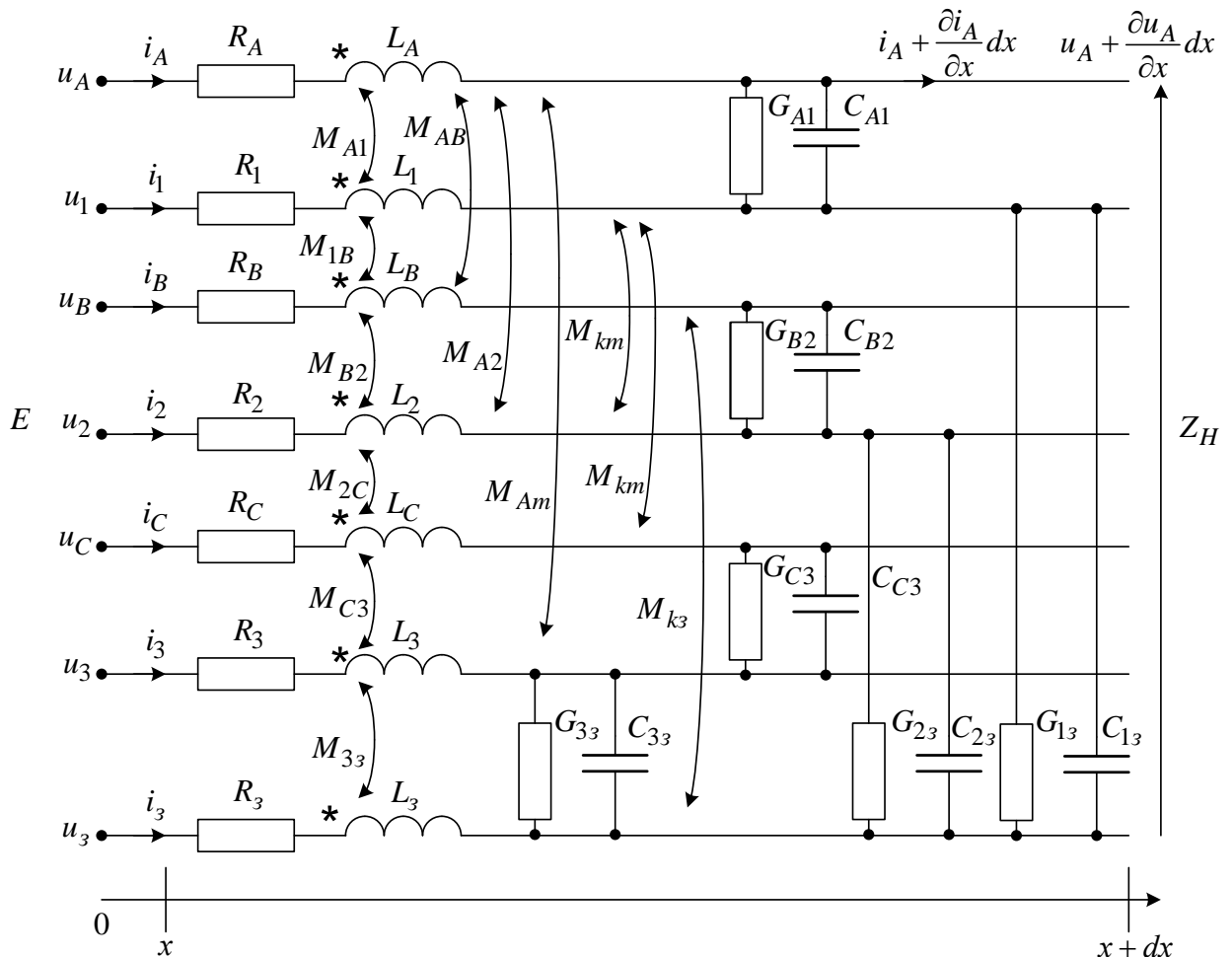


Рисунок 2.5 – Схема заміщення трифазного симетричного електричного кола з взаємоіндуктивними зв'язками

Модель складається з семи ділянок лінії з розподіленими параметрами, що представляють собою три провідника (струмопровідна жила) ( $A, B, C$ ) і три провідника електромагнітних екранів кабелю ( $1, 2, 3$ ), сьома ділянка моделює землю ( $3$ ) [91,96]. Кожна ділянка кола моделюється позовжніми  $Z = R + j\omega L$  і продольними  $Y = G + j\omega C$  параметрами на одиницю довжини.

Напруга  $u(x,t)$  та струм  $i(x,t)$  є функціями часу  $t$  та відстані  $x$  вважаються позитивним від джерела ЕРС ( $E$ ) до навантаження ( $Z_H$ ).

За законами Кірхгофа було отримано систему диференціальних рівнянь для узагальненої схеми заміщення трифазного кабельної лінії з розподіленим параметрами:

$$-\frac{\partial u_{k3}}{\partial x} = R_k i_k + L_k \frac{\partial i_k}{\partial t} + \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} M_{km} \frac{\partial i_m}{\partial t} - R_3 i_3 - L_3 \frac{\partial i_3}{\partial t} - \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} M_{m3} \frac{\partial i_m}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$-\frac{\partial i_k}{\partial x} = \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} G_{km} u_{km} + \sum_{\substack{k,m=A,B,C \\ 1,2,3 \\ m \neq k}} C_{km} \frac{\partial u_{km}}{\partial t} \quad (2.5)$$

де  $M_{km}$  – це взаємна індуктивність між провідниками  $k$  та  $m$ . Параметри на одиницю довжини ( $R, L, M, C$  и  $G$ ) задаються з урахуванням фізичних і геометричних характеристик кабелю.

Рівняння (2.4) і (2.5) являють собою диференціальні рівняння часткових похідних гіперболічних функцій, які можуть бути вирішені з використанням класичного або операторного методу розрахунку перехідних процесів. Однак при будь-якому методі рівняння (2.4) і (2.5) не можуть бути однозначно вирішені, якщо не задані додаткові початкові і граничні умови, які

визначають фізичну природу досліджуваних явищ і схем з'єднання. При нульових початкових умовах до моменту початку перехідного процесу (при  $t = 0$ ) в лінії відсутня напруга і струм:

$$u(x,0) = 0; i(x,0) = 0 \text{ где } x \in (0,l).$$

При ненульових початкових умов струми і напруги розподіляються за відомими законами, які визначаються загальними умовами завдання і визначаються як відомі функції координати  $x$  –  $u_H(x)$ ,  $i_H(x)$ , які визначаються сталим режимом лінії до комутації (при  $t < 0$ ):

$$\begin{aligned} u(x,0) &= u_H(x), \\ i(x,0) &= i_H(x). \end{aligned}$$

Граничні умови задаються впливом на початку лінії (при  $x=l$ ) як функція часу в момент комутації (при  $t=0$ )

$$u(l,t) = u_1(t), i(l,t) = i_1(t) \text{ при } t \geq 0,$$

де  $u_1(t)$ ,  $i_1(t)$  – напруга та струм від джерела.

В якості математичної моделі електромагнітного перехідного процесу зазвичай вибирають хвильові рівняння, які доповнюються рівняннями, що характеризуються граничними і початковими умовами. При вирішенні завдань такого класу можуть спостерігатися стрибкоподібні зміни граничних умов, при впливі комутацій на перехідні процеси. При цьому початкові умови відповідають законам розподілу струму і напруги по довжині кола при стаціонарному режимі, які мають місце до моменту комутації [97,98].

### **2.3. Математична модель перехідних процесів у трифазних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками**

Наявність часткових похідних в рівняннях (2.4) і (2.5) обумовлено тим, що напруга і струм залежать від двох аргументів: координати  $x$  і часу  $t$ . При

дії синусоїдальної ЕРС, електричну модель трифазної симетричної кабельної лінії представимо у вигляді матриці:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{I}}}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \underline{\mathbf{Z}} \\ \underline{\mathbf{Y}} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{I}} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

де  $\mathbf{U}$  та  $\mathbf{I}$  матриці-стовпці зображень напруги і струму в фазних провідниках ( $\mathcal{J}$ ) і електромагнітних екранах ( $e$ ) трифазної кабельної лінії:

$$\dot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{\mathcal{J}} \\ \dot{\mathbf{U}}_e \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}^T \quad \dot{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathcal{J}} \\ \dot{\mathbf{I}}_e \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}^T$$

Матриці повних опорів  $\underline{\mathbf{Z}}$  і провідності  $\underline{\mathbf{Y}}$  є квадратними матрицями шостого порядку, що складаються із симетричних квадратних матриць третього порядку:

$$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Z}}_{\mathcal{J}} & \underline{\mathbf{Z}}_{\mathcal{J}e} \\ \underline{\mathbf{Z}}_{\mathcal{J}e} & \underline{\mathbf{Z}}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}t} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}ee} \\ \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}t} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}ee} \\ \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}t} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}t} & \underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}ee} \\ \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_e & \underline{z}_{et} & \underline{z}_{ee} \\ \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{et} & \underline{z}_e & \underline{z}_{et} \\ \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}et} & \underline{z}_{\mathcal{J}e} & \underline{z}_{et} & \underline{z}_{et} & \underline{z}_e \end{bmatrix}$$

$$\underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}} = R_{\mathcal{J}} + R_3 + j\omega(L_{\mathcal{J}} + L_3 - 2M_{\mathcal{J}\mathcal{J}3})$$

$$\underline{z}_{\mathcal{J}\mathcal{J}t} = R_3 + j\omega(L_3 + M_{\mathcal{J}\mathcal{J}\mathcal{J}} - 2M_{\mathcal{J}\mathcal{J}3})$$

$$\underline{z}_{\mathcal{J}e} = R_3 + j\omega(L_3 + M_{\mathcal{J}e} - 2M_{\mathcal{J}\mathcal{J}3})$$

$$\underline{z}_{жс\epsilon\tau} = R_3 + j\omega(L_3 + M_{жс\epsilon'} - 2M_{жс3})$$

$$\underline{z}_e = R_e + R_3 + j\omega(L_e + L_3 - 2M_{e3})$$

$$\underline{z}_{\epsilon\tau} = R_3 + j\omega(L_3 + M_{ee} - 2M_{e3})$$

де  $\underline{z}_{ж}$  – власні опори фазних провідників по діагоналі та  $\underline{z}_{ж\tau\tau}$  – взаємні опори між фазами поза діагоналлю;  $\underline{z}_e$  – власні опори екранів по діагоналі та  $\underline{z}_{\epsilon\tau}$  – взаємні опори між екранами поза діагоналлю;  $\underline{z}_{ж\epsilon}$  – взаємні опори між провідником і екраном однієї і тієї ж фази та  $\underline{z}_{ж\epsilon\tau}$  – взаємні опори між провідником і екраном різних фаз поза діагоналлю;

$$\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{ж\epsilon} & -\underline{\mathbf{Y}}_{ж\epsilon} \\ -\underline{\mathbf{Y}}_{ж\epsilon} & \underline{\mathbf{Y}}_{ж\epsilon3} \end{bmatrix} = \left[ \begin{array}{ccc|ccc} \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} \\ \hline \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon3} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon3} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon} & 0 & 0 & \underline{y}_{ж\epsilon3} \end{array} \right]$$

де  $\underline{y}_{ж}$  та  $\underline{y}_e$  – власні провідності провідників та екранів у фазах, причому  $\underline{y}_{ж\epsilon} = -\underline{y}_{ж}$ ,  $\underline{y}_{ж\epsilon3} = \underline{y}_{ж\epsilon} + \underline{y}_{ж3}$  – власні провідності між жилою, екраном і землею.

Так як система симетрична, приймаємо:

$$M_{жсж} = M_{жс\epsilon'} = M_{ee};$$

$$M_{жсжс} = M_{AB} = M_{BC} = M_{CA};$$

$$M_{жс\epsilon'} = M_{A2} = M_{A3} = M_{B1} = M_{B3} = M_{C1} = M_{C2};$$

$$M_{ee} = M_{12} = M_{13} = M_{23};$$

$$M_{жс\epsilon} = M_{A1} = M_{B2} = M_{C3};$$

$$M_{жс3} = M_{e3};$$

$$M_{жс3} = M_{A3} = M_{B3} = M_{C3}.$$

Розрахунок параметрів проводився на одиницю довжини. Фізичні параметри ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$ ) задані аналітично у відповідності з фізичними та геометричними характеристиками кабелю (рис. 2.6). Опір розрахований в залежності від питомого опору матеріалу, індуктивність зв'язана з магнітним полем, ємність визначається електричним полем. Провідність виражена дисипацією енергії у ізоляції кабелю [93, 99, 100].

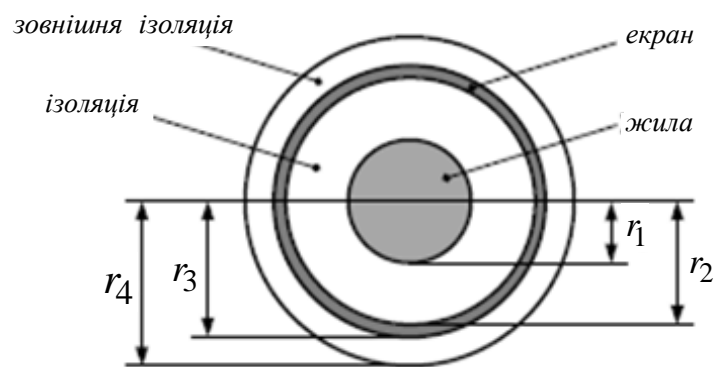


Рисунок 2.6 – Геометричні параметри однофазного кабелю із СПЕ ізоляцією

Власні опори струмопровідної жили, екрану і землі, на одиницю довжини, з урахуванням скін-ефекту розраховували за формулами:

$$R_{жс} = \frac{\rho}{\pi \left[ r_1^2 - \left( r_1 - \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \mu \omega}} \right)^2 \right]},$$

$$R_e = \rho_e \frac{1}{\pi (r_3^2 - r_2^2)}, \quad R_s = \rho_s \frac{\mu_0 \mu \omega}{2\rho \pi},$$

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу,  $\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність вакууму,  $\mu$  – відносна магнітна проникність провідника,  $r_1$  – радіус струмопровідної

жили кабелю,  $r_2$  – внутрішній радіус електромагнітного екрану кабелю,  $r_3$  – зовнішній радіус електромагнітного екрану кабелю.

Розрахунок самоіндукції струмопровідної жили ( $L_{ж}$ ), електромагнітного екрану ( $L_e$ ), землі ( $L_3$ ), та взаємоіндукції жила-екран ( $M_{же}$ ), жила-земля ( $M_{ез}$ ), екран-земля ( $M_{ез}$ ) проводилося з урахуванням накопиченої кількості магнітної енергії, з використанням рівняння Лагранжа [93, 100]

$$L_{ж} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_1}{1} + \frac{\mu_0}{8\pi},$$

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{r_3^2 (r_3^2 - 2r_2^2)}{(r_3^2 - r_2^2)^2} \ln \frac{r_3}{1} + \frac{r_2^4}{(r_3^2 - r_2^2)^2} \ln \frac{r_2}{1} + \frac{r_2^2}{2(r_3^2 - r_2^2)^2} \right) + \frac{\mu_0}{8\pi},$$

$$L_{ж} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu\omega}}}{1} + \frac{\mu_0}{8\pi},$$

$$M_{же} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{r_3^2}{(r_3^2 - r_2^2)} \ln \frac{r_3}{1} + \frac{r_2^2}{(r_3^2 - r_2^2)} \ln \frac{r_2}{1} - \frac{1}{2} \right),$$

$$M_{жз} = M_{ез} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{\sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu\omega}}}{1} - \frac{h}{\sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu\omega}}} \left( 1 - \frac{h}{2\sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu\omega}}} \right) \right),$$

де  $h$  – еквівалентна глибина кабелю під землею.

Розрахунок ємності обумовлено різницею потенціалів, яка існує між трьома провідниками. Розрахунок ємностей між жилою і екраном  $C_{же}$ , та між екраном і землею  $C_{ез}$  розраховувалися з використанням теореми Гаусса [93]

$$C_{же} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i_{же}}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad C_{ез} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i_{ез}}}{\ln \frac{r_3}{r_4}},$$

де  $\epsilon_i$  – діелектрична проникність СПЕ ізоляції у вакуумі,  $r_4$  – зовнішній радіус кабелю.

Провідності кабелю відповідають повздовжнім втратам із-за недосконалою природи діелектриків, які існують між жилою та екраном, як правило ці провідності дуже незначні.

Матриця **ZY** системи (2.6) має 12 порядок і є симетричною. Рішення даної системи – завдання громіздке, так як є взаємоіндуктивні зв'язки між провідниками і електромагнітними екранами кабелів трифазного електричного кола. Для спрощення розрахунку системи (2.6) у роботі використано матричне перетворення, що представляє собою матричне перетворення даної системи рівнянь з ціллю отримання системи незалежних, рішення які окремо суттєво спрощуються, ніж рішення системи взаємопов'язаних рівнянь. В результаті такого перетворення матриці **ZY** стають діагональними.

Рівність діагональних і недіагональних елементів між собою приводить до того, що матриці **Z** та **Y** мають кратні власні значення. В результаті цього з'являється можливість у виборі матриць перетворення, так як для кратних власних значень рівняння щодо власних векторів має безліч рішень.

Одним із зручних виборів матриці перетворення, що забезпечують еквівалентне уявлення трифазної лінії у вигляді трьох незалежних двопровідних ліній, є перетворення за методом симетричних складових, що використовується при аналізі несиметричних режимів трифазного кола:

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}, \quad \underline{\mathbf{F}}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix}$$



где  $a = e^{j120^\circ}$ .

При цьому для симетричних трифазних напруг прямої та оберненої послідовностей струми в провідниках також утворюють симетричні системи прямої та оберненої послідовності. Для напруги та струму нульової послідовності оберненим проводом слугує земля.

Використовуючи симетричні складові для переходу матриці  $\underline{\mathbf{Z}}$  до діагонального виду за допомогою матриці перетворення  $\underline{\mathbf{F}}$ :

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{Z}}^{012} &= \underline{\mathbf{F}}^{-1} \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{F}} = \\ &= \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Z}}_{жс}^{012} & \underline{\mathbf{Z}}_{жсе}^{012} \\ \underline{\mathbf{Z}}_{жсе}^{012} & \underline{\mathbf{Z}}_e^{012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{z}_{жс}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_{жсе}^{012} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{жс}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_{жсе}^{012} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{жс}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_{жсе}^{012} \\ \hline \underline{z}_{жсе}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_e^{012} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{z}_{жсе}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_e^{012} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{z}_{жсе}^{012} & 0 & 0 & \underline{z}_e^{012} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} \underline{z}_{жс}^0 &= \underline{z}_{жс} + 2\underline{z}_{жст}, & \underline{z}_{жс}^1 &= \underline{z}_{жс}^2 = \underline{z}_{жс} - \underline{z}_{жст}, \\ \underline{z}_{жсе}^0 &= \underline{z}_{жсе} + 2\underline{z}_{жсез}, & \underline{z}_{жсе}^1 &= \underline{z}_{жсе}^2 = \underline{z}_{жсе} - \underline{z}_{жсез}, \\ \underline{z}_e^0 &= \underline{z}_e + 2\underline{z}_{ет}, & \underline{z}_e^1 &= \underline{z}_e^2 = \underline{z}_e - \underline{z}_{ет}, \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{Y}}^{012} = \underline{\mathbf{F}}^{-1} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{жсе} & -\underline{\mathbf{Y}}_{жс}^{012} \\ -\underline{\mathbf{Y}}_{жсе}^{012} & \underline{\mathbf{Y}}_{жсез}^{012} \end{bmatrix}.$$

Після трансформації системи симетричними складовими (2.6), де пряма – 1, обернена – 2 та нульова – 0 послідовності, кожна з яких представлена матричною системою рівнянь:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{U}}^{012}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{I}}^{012}}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \underline{\mathbf{Z}}^{012} \\ \underline{\mathbf{Y}}^{012} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}^{012} \\ \dot{\mathbf{I}}^{012} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

в якій матриці стовпці напруги та струму у симетричних складових для струмопровідної жили та електромагнітного екрану, відповідно

$$\dot{\mathbf{U}}^{012} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{\text{жс}}^{012} \\ \dot{\mathbf{U}}_e^{012} \end{bmatrix}^T \quad \dot{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\text{жс}}^{012} \\ \dot{\mathbf{I}}_e^{012} \end{bmatrix}^T$$

### 2.3.1 Визначення початкових умов

Для того щоб визначити змінні напруги і струму матриці (2.7) у симетричних складових, обчислено диференціальні рівняння другого

порядку  $\frac{\partial^2 \dot{\mathbf{U}}}{\partial x}$  та  $\frac{\partial^2 \dot{\mathbf{I}}}{\partial x}$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{U}}^{012}}{\partial x} = \underline{\mathbf{Z}}^{012} \underline{\mathbf{Y}}^{012} \dot{\mathbf{U}}^{012} \\ \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{I}}^{012}}{\partial x} = \underline{\mathbf{Y}}^{012} \underline{\mathbf{Z}}^{012} \dot{\mathbf{I}}^{012} \end{cases} \quad (2.8)$$

Рішенням системи рівнянь (2.8), є матриці-стовпці, які застосовуються для кожної складової

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}(x) &= \underline{\mathbf{X}}_1^{012} e^{p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_1'^{012} e^{-p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_2^{012} e^{p_2 x} + \underline{\mathbf{X}}_2'^{012} e^{-p_2 x} \\ \dot{\mathbf{I}}(x) &= \underline{\mathbf{X}}_3^{012} e^{p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_3'^{012} e^{-p_1 x} + \underline{\mathbf{X}}_4^{012} e^{p_2 x} + \underline{\mathbf{X}}_4'^{012} e^{-p_2 x} \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $\underline{\mathbf{X}}_1^{012}, \underline{\mathbf{X}}_1'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_2^{012}, \underline{\mathbf{X}}_2'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_3^{012}, \underline{\mathbf{X}}_3'^{012}, \underline{\mathbf{X}}_4^{012}, \underline{\mathbf{X}}_4'^{012}$  – матриці константи, що знаходяться з граничних умов,  $e^{px}$  – матрична експонента, де власні значення знаходяться з характеристичного рівняння

$$\det(\mathbf{p}^{012}\mathbf{E} - \underline{\mathbf{Z}}^{012}\underline{\mathbf{Y}}^{012}) = 0$$

де  $\mathbf{E}$  – одинична матриця.

Матриці  $\underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{Y}}^{1/2}$  та  $\underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{Y}}$  мають однакові діагональні та недиагональні елементи [17], позначені через  $b_1$  та  $b_2$  відповідно. Щоб скористатися теоремою Сільвестра [101], необхідно знати власні числа та власні вектори матриця  $\mathbf{p} = \underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{Y}}^{1/2}$ . Тоді  $\mathbf{p}$ -матриця:

$$F(p) = \begin{vmatrix} p-b & -b_1 & -b_1 \\ -b_1 & p-b & -b_1 \\ -b_1 & -b_1 & p-b \end{vmatrix}. \quad (2.10)$$

Детермінант матриці

$$\Delta p = (p-b)^3 - 2b_1^3 - 3b_1^2(p-b)$$

Характеристичне рівняння записано у вигляді

$$(p-b)^3 - 2b_1^3 - 3b_1^2(p-b) = (p-b-2b_1)(p-b+2b_1)^2 = 0$$

Корені цього рівняння

$$p_0 = b + 2b_1$$

$$p_1 = p_2 = b - b_1$$

Видно, що рівняння має два кратних кореня, використовуючи співвідношення по теоремі Сільвестра [101] отримаємо

$$\text{ch } \mathbf{p}x = \text{ch } p_1 x \frac{p_0 \mathbf{E} - \mathbf{p}}{p_0 - p_1} + \text{ch } p_0 x \frac{(p_1 \mathbf{E} - \mathbf{p})^2}{(p_1 - p_0)^2} \quad (2.11)$$

Матриці  $p_0 \mathbf{E} - \mathbf{p}$  та  $(p_1 \mathbf{E} - \mathbf{p})^2$  отримали, підставивши значення  $p_0, p_1, p_2$  в матрицю (2.10):

$$\begin{aligned}
 p_0 \mathbf{E} - \mathbf{p} &= \begin{vmatrix} b+2b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b+2b_1 & 0 \\ 0 & 0 & b+2b_1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} b & b_1 & b_1 \\ b_1 & b & b_1 \\ b_1 & b_1 & b \end{vmatrix} = b_1 \begin{vmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{vmatrix} \\
 (p_1 \mathbf{E} - \mathbf{p})^2 &= \left( \begin{vmatrix} b-b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b-b_1 & 0 \\ 0 & 0 & b-b_1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} b & b_1 & b_1 \\ b_1 & b & b_1 \\ b_1 & b_1 & b \end{vmatrix} \right)^2 = 2b_1^2 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

Підставивши (2.11) у відповідні матриці (2.12), отримали

$$\text{ch } \mathbf{p}x = \text{ch } p_1 x \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{vmatrix} + \text{ch } p_0 x \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.13)$$

Підставивши вектор фазних напруг у вигляді суми трьох векторів, які пропорційні власним векторам та помноживши (2.13) з права на цю суму векторів, отримали для напруги у точці  $x$  лінії вираз, аналогічний (2.9), з коефіцієнтами поширення  $p^0 = p_0$  та  $p^1 = p^2 = p_1$ .

Отже, рішення для рівняння (2.9), є остаточною математичною моделлю трифазної кабельної лінії для напруг струмопровідної жили та електромагнітного екрану, вираженої через гіперболічні функції

$$U_{\text{жс}}(x) = X_1 \text{ch}(p_1 x) + X_1 \text{sh}(p_1 x) + X_3 \text{ch}(p_2 x) + X_4 \text{sh}(p_2 x)$$

$$U_e(x) = X_1^e \text{ch}(p_1 x) + X_2^e \text{sh}(p_1 x) + X_3^e \text{ch}(p_2 x) + X_4^e \text{sh}(p_2 x) \quad (2.14)$$

Аналогічно представлення струму в лінії через симетричні складові можна зробити, використовуючи рівняння (2.14). Після диференціювання рівняння (2.14), отримали

$$\frac{\partial U_{\text{жс}}(x)}{\partial x} = p_1 X_1 \text{ch}(p_1 x) + p_1 X_1 \text{sh}(p_1 x) + p_2 X_3 \text{ch}(p_2 x) + p_2 X_4 \text{sh}(p_2 x) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial U_e(x)}{\partial x} = p_1 X_1^e \text{ch}(p_1 x) + p_1 X_2^e \text{sh}(p_1 x) + p_2 X_3^e \text{ch}(p_2 x) + p_2 X_4^e \text{sh}(p_2 x)$$

Вирази для струмів, що протікають в провіднику і екранах, визначимо з співвідношень (2.15), використовуючи хвильовий опір симетричних каналів

$$Z_C I_{жс}(x) = Z_e \frac{\partial U_{жс}(x)}{\partial x} - Z_{жсе} \frac{\partial U_e(x)}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$Z_C I_e(x) = Z_{жс} \frac{\partial U_e(x)}{\partial x} - Z_{жсе} \frac{\partial U_{жс}(x)}{\partial x}$$

де  $Z_C = z_{жс}z_e - z_{жсе}^2$  записаного на підставі подання елементарної ділянки кабелю з розподіленими параметрами (рис.2.15) для визначення хвильового опору симетричних каналів.

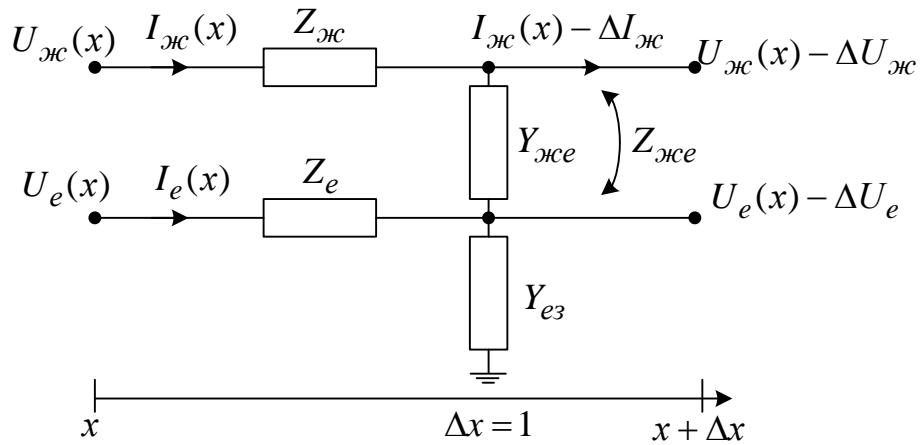


Рисунок 2.7 – Елементарна ділянка кабельної лінії для визначення хвильового опору симетричних каналів

Після математичних перетворень, рівняння (2.14) будуть:

$$I_{жс}(x) = \frac{p_1}{Z_c} \left( (z_e X_1 - z_{жсе} X_1^e) sh(p_1 x) + (z_e X_2 - z_{жсе} X_2^e) ch(p_1 x) \right) + \frac{p_2}{Z_c} \left( (z_e X_3 - z_{жсе} X_3^e) sh(p_2 x) + (z_e X_4 - z_{жсе} X_4^e) ch(p_2 x) \right) \quad (2.17,a)$$

$$I_e(x) = \frac{p_1}{Z_c} \left( (z_{жс} X_1^{жс} - z_{жсе} X_1) sh(p_1 x) + (z_{жс} X_2^{жс} - z_{жсе} X_2) ch(p_1 x) \right) + \quad (2.17, б)$$

$$+ \frac{p_2}{Z_c} \left( (z_{жс} X_3^{жс} - z_{жсе} X_3) sh(p_2 x) + (z_{жс} X_4^{жс} - z_{жсе} X_4) ch(p_2 x) \right)$$

Після диференціювання рівняння (2.17,а,б), отримали

$$\frac{\partial I_{жс}(x)}{\partial x} = \frac{p_1^2}{Z_c} \left( (z_e X_1 - z_{жсе} X_1^e) ch(p_1 x) + (z_e X_2 - z_{жсе} X_2^e) sh(p_1 x) \right) +$$

$$+ \frac{p_2^2}{Z_c} \left( (z_e X_3 - z_{жсе} X_3^e) ch(p_2 x) + (z_e X_4 - z_{жсе} X_4^e) sh(p_2 x) \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial I_e(x)}{\partial x} = \frac{p_1^2}{Z_c} \left( (z_{жс} X_1^{жс} - z_{жсе} X_1) ch(p_1 x) + (z_{жс} X_2^{жс} - z_{жсе} X_2) sh(p_1 x) \right) +$$

$$+ \frac{p_2^2}{Z_c} \left( (z_{жс} X_3^{жс} - z_{жсе} X_3) ch(p_2 x) + (z_{жс} X_4^{жс} - z_{жсе} X_4) sh(p_2 x) \right)$$

Таким чином, зв'язавши вирази (2.6), (2.7) та (2.18) отримаємо нові диференціальні вирази для струмів  $I_{жс}(x)$  и  $I_e(x)$

$$\frac{\partial I_{жс}(x)}{\partial x} = (y_{жс} X_1 + y_{жсе} X_1^e) ch(p_1 x) + (y_{жс} X_2 + y_{жсе} X_2^e) sh(p_1 x) +$$

$$+ (y_{жс} X_3 + y_{жсе} X_3^e) ch(p_2 x) + (y_{жс} X_4 + y_{жсе} X_4^e) sh(p_2 x) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial I_e(x)}{\partial x} = (y_e X_1^e + y_{жсе} X_1) ch(p_1 x) + (y_e X_2^e + y_{жсе} X_2) sh(p_1 x) +$$

$$+ (y_e X_3^e + y_{жсе} X_3) ch(p_2 x) + (y_e X_4^e + y_{жсе} X_4) sh(p_2 x)$$

Прирівнявши рівняння (2.18) і (2.19) можна записати остаточний вигляд стаціонарних функцій напруги і струму до для кожної послідовності, що описують математичну модель однієї фази трифазної кабельної лінії

$$U_{\text{жс}}(x) = X_1 ch(p_1 x) + X_1 sh(p_1 x) + X_3 ch(p_2 x) + X_4 sh(p_2 x)$$

$$U_e(x) = [X_1 ch(p_1 x) + X_2 sh(p_1 x)] \frac{z_e p_1^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}}} +$$

$$+ [X_3 ch(p_2 x) + X_4 sh(p_2 x)] \frac{z_e p_2^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}}}$$

$$I_{\text{жс}}(x) = X_1 ch(p_1 x) \frac{z_e p_1^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}}} + X_2 sh(p_1 x) \frac{z_e p_2^2 - z_C y_{\text{жс}}}{z_{\text{жс}} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}}} +$$

$$+ X_3 ch(p_2 x) \frac{-p_1 (z_e y_{\text{жс}} + z_{\text{жс}} y_{\text{жс}})}{z_{\text{жс}} p_1^2 + z_C y_{\text{жс}}} + X_4 sh(p_2 x) \frac{-p_2 (z_e y_{\text{жс}} + z_{\text{жс}} y_{\text{жс}})}{z_{\text{жс}} p_2^2 + z_C y_{\text{жс}}} \quad (2.20)$$

$$I_e(x) = [X_1 ch(p_1 x) + X_2 sh(p_1 x)] \frac{p_1 (z_{\text{жс}}^2 p_1^2 - z_{\text{жс}} z_e p_1^2 + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}} + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}})}{z_C (z_{\text{жс}}^2 p_1^2 + z_C y_{\text{жс}})} +$$

$$+ [X_3 ch(p_2 x) + X_4 sh(p_2 x)] \frac{p_2 (z_{\text{жс}}^2 p_2^2 - z_{\text{жс}} z_e p_2^2 + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}} + z_C z_{\text{жс}} y_{\text{жс}})}{z_C (z_{\text{жс}}^2 p_2^2 + z_C y_{\text{жс}})}$$

### 2.3.2 Визначення граничних умов

При підключенні лінії до трифазного джерела живлення, потрібно визначити чотири коефіцієнта  $X_1^{012}$ ,  $X_2^{012}$ ,  $X_3^{012}$ ,  $X_4^{012}$  для кожної складової. Для цього слід задатися дванадцятьма граничними умовами, які визначаються із записів напруги і струму на початку лінії і різних граничних умов, що залежать від електричної конфігурації кола (Рис.2.8).

На початку лінії, потрібно задати початкові значення напруг і струмів генератора для струмопровідних провідників і екранів кожної з фаз кабельної лінії:  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ . Наприклад, для комутаційного режиму, при включенні лінії до джерела трифазного ЕРС потрібно 12 рівнянь граничних

умов записаних шляхом завдання шести рівнянь початкових значень напруг і струмів в провідниках і жилах кожної з фаз кабельної лінії для кожної складової:

$$u^{012}_{жт}(0) = u^{012}_{жт,задане}$$

$$i^{012}_{жт}(0) = i^{012}_{жт,задане}$$

де  $m=A, B, C$ .

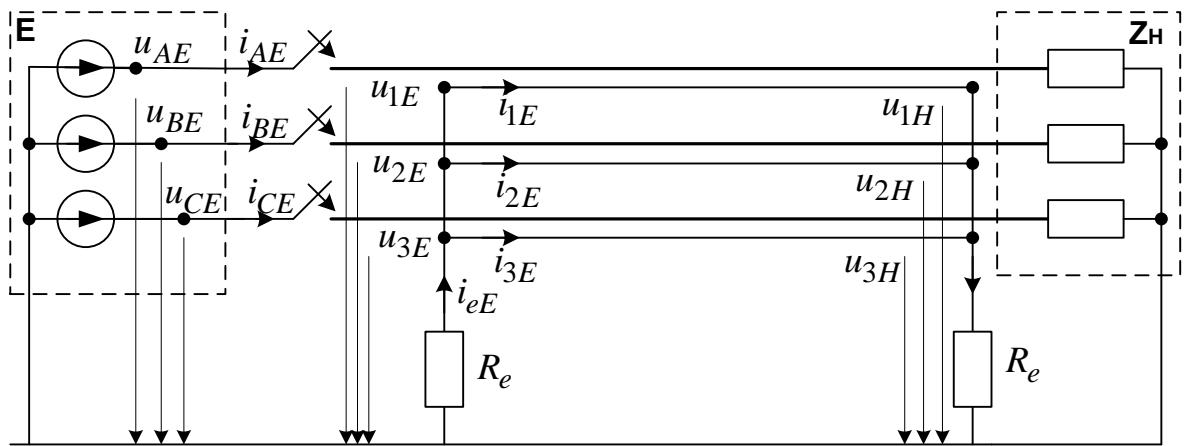


Рисунок 2.8 – Електрична конфігурація навантаженої трифазної кабельної лінії

І ще шість рівнянь для напруги і струму в екранах кожної фази на початку (від джерела напруги  $E$ ) і в кінці лінії (на навантаженні  $Z_H$ ):

$$u_{1E}(0) = -R_e i_{eE}$$

$$u_{1H}(l) = R_e i_{eH}(l)$$

$$u_{2E}(0) = -R_e i_{eE}$$

$$u_{2H}(l) = R_e i_{eH}(l)$$

$$u_{3E}(0) = -R_e i_{eE}$$

$$u_{3H}(l) = R_e i_{eH}(l)$$

Які у симетричних складових записуються

$$u^0_{eE}(0) = -3R_e i^0_{eE}$$

$$u^0_{eH}(l) = 3R_e i^0_{eH}(l)$$

$$u^1_{eE}(0) = 0$$

$$u^1_{eH}(l) = 0$$



$$u_{eE}^2(0) = 0$$

$$u_{eH}^2(l) = 0$$

У разі однофазного короткого замикання фази  $A$  на землю на відстані  $l_F$  (рис. 2.9) граничні умови записуються для ділянки трифазної лінії до ( $0 \leq x \leq l_F$ ) та після ( $l_F \leq x \leq l$ ) місця комутації (короткого замикання). В результаті отримано шість однофазних кіл з чотирма невідомими  $X_i^{012}$  в кожній, які визначаються з системи (2.20). Таким чином, внаслідок поділу лінії на дві ділянки, в загальному рішенні відбувається подвоєння числа невідомих параметрів схеми до восьми, для кожного наступного рівняння системи. Це вимагає 24 граничних умов для всіх послідовностей фаз.

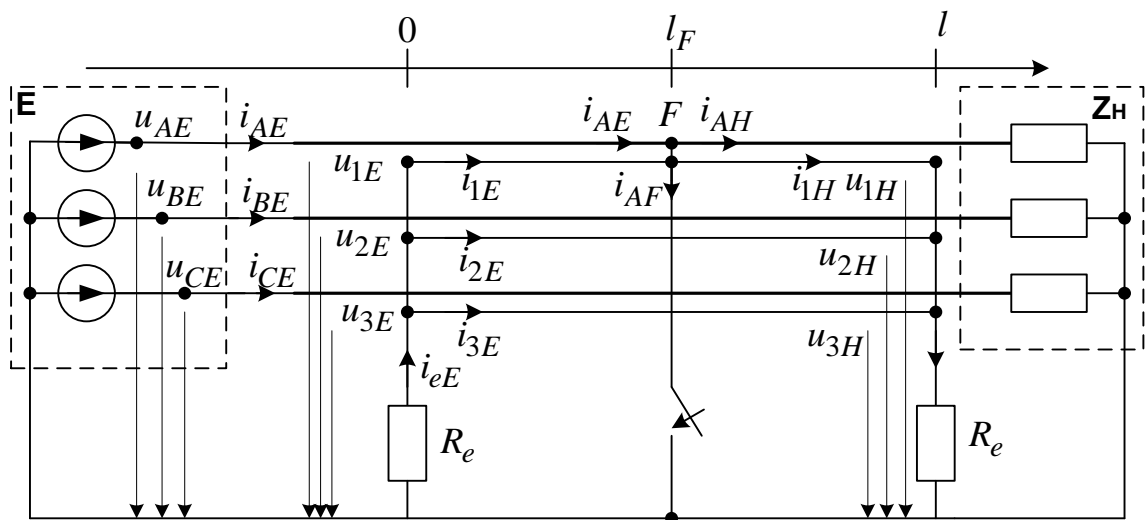


Рисунок 2.9 – Електрична конфігурація навантаженої трифазної кабельної лінії при однофазному замиканні на землю фази А

Двадцять чотири невідомих визначаються шляхом об'єднання системи рівнянь (3.19), що моделює три послідовності (0, 1, 2) з відповідними рівняннями граничних умов, заданими для ділянок кола до і після місця комутації. Ці граничні умови виражаються з урахуванням безперервності

напруги вздовж кабелю і, зокрема, в точці, безперервності струму фаз в нормальному режимі і струму навантаження.

Початкова умова вхідної напруги провідника дорівнює заданій напрузі джерела живлення для всіх послідовностей фаз для ділянки лінії до місця комутації ( $0 \leq x \leq l_F$ )

$$u^0_{жЕ}(0) = u^0_{жЕ,задане}$$

$$u^1_{жЕ}(0) = u^1_{жЕ,задане}$$

$$u^2_{жЕ}(0) = u^2_{жЕ,задане}$$

Струм в провіднику дорівнює заданому струму джерела

$$i^0_{жЕ}(0) = i^0_{жЕ,задане}$$

$$i^1_{жЕ}(0) = i^1_{жЕ,задане}$$

$$i^2_{жЕ}(0) = i^2_{жЕ,задане}$$

Нульова послідовність струму в екрані дорівнює

$$i^0_{еЕ}(0) = i^0_{еЕ,задане}$$

Напруга екрану нульової послідовності задається як опір заземлення, помноженого на струм провідника

$$u^0_{еЕ}(0) = -3R_e i^0_{еЕ}(0)$$

Напруга на екрані прямої і зворотної послідовностей дорівнюють нулю

$$u^1_{еЕ}(0) = 0$$

$$u^2_{еЕ}(0) = 0$$

Наступні умови для напруги провідника і екрану повинні виконуватися в точці комутації для ділянки лінії ( $x=l_F$ )

$$u^0_{жН}(l_F) = u^0_{жЕ}(l_F) \quad u^A_{еН}(l_F) = u^A_{еЕ}(l_F)$$

$$u^1_{жН}(l_F) = u^1_{жЕ}(l_F) \quad u^B_{еН}(l_F) = u^B_{еЕ}(l_F)$$

$$u^2_{жН}(l_F) = u^2_{жЕ}(l_F) \quad u^C_{еН}(l_F) = u^{AC}_{еЕ}(l_F)$$

У робочих фазах В і С, струм в провідниках і екранах в точці комутації для ділянки лінії ( $x=l_F$ )

$$\begin{aligned} i_{жH}^B(l_F) &= i_{жE}^B(l_F) & i_{eH}^B(l_F) &= i_{eE}^B(l_F) \\ i_{жH}^C(l_F) &= i_{жE}^C(l_F) & i_{eH}^C(l_F) &= i_{eE}^C(l_F) \end{aligned}$$

Напруга провідника на навантаженні пошкодженої фази

$$u_{жH}^A(l) = Z_H i_{жH}^A(l)$$

Напруга екрану нульової послідовності задається як опір заземлення, помноженого на струм екрану

$$u_{eH}^0(l) = 3R_e i_{eH}^0(l)$$

Напруга прямої і зворотної послідовностей після точки комутації на ділянці лінії ( $l_F \leq x \leq l$ ) дорівнює нулю

$$\begin{aligned} u_{eE}^1(l) &= 0 \\ u_{eE}^2(l) &= 0 \end{aligned}$$

Отримана математична модель трифазного кабельної лінії з розподіленими параметрами дозволяє, проводити розрахунки і аналіз перехідних процесів в трифазних кабельних лініях і забезпечує рішення практичних завдань. Розрахункова модель дозволяє підвищити точність розрахунку, шляхом обліку сукупності особливостей електромагнітних процесів в схемах заміщення, що визначаються між фазними зв'язками в наслідок впливу електромагнітного поля між однофазними кабелями в трифазному електричному колі.

Математична модель трифазного кабельної лінії з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками складена на підставі диференціальних рівнянь стану кола, граничних і початкових умов для розрахунку і аналізу

перехідних електромагнітних процесів нормального і аварійного режимів роботи [102].

## **2.4 Висновки до розділу 2**

1. Проведений аналіз залежності характеристик хвильових каналів від частоти показує, що в першому наближенні дослідження перенапруг, що виникають на ізоляції провідник-екран, може проводитися при неврахуванні взаємовпливу фаз кабельної лінії. У свою чергу, перенапруги, що виникають на ізоляції екран-земля, повинні аналізуватися при обліку взаємного впливу процесів, що відбуваються в фазних колах екран-земля.

2. Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками, шляхом представлення цих кіл багатополісниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості між фазних електромагнітних зв'язків.

3. Розроблено нову математичну модель трифазних електричних кіл, як розгалужених кіл із розподіленими параметрами та між фазними зв'язками, шляхом складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах та з урахуванням взаємних електромагнітних зв'язків.

4. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних кабельних лініях електропередачі, як трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними зв'язками, визначено особливості виникнення в них власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

5. Удосконалено метод розрахунку перехідних електромагнітних процесів в кабельних лініях електропередачі, як у трифазних електричних

колах з розподіленими параметрами і взаємними електромагнітними зв'язками. Метод дозволяє підвищити точність розрахунку, шляхом обліку сукупності особливостей електромагнітних процесів в схемах заміщення, що визначаються міжфазними зв'язками в наслідок електромагнітного поля між однофазними кабелями трифазного електричного кола.

6. Досліджено математичну модель перехідних процесів в трифазних колах з взаємоіндуктивними зв'язками і розподіленими параметрами, отримано перехідні функції струмів і напруг з урахуванням нульових і ненульових початкових умов для будь-якої схеми комутації, що дозволяє, проводити розрахунки і аналіз перехідних процесів в трифазних кабельних лініях і забезпечує рішення практичних завдань.

## **РОЗДІЛ 3**

### **РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ЯК БАГАТОПОЛЮСНИКАХ, ЩО ВРАХОВУЮТЬ ЇХНІ РОЗПОДІЛЕНІ ПАРАМЕТРИ ТА МІЖФАЗНІ ЗВ'ЯЗКИ**

При розробленні математичної моделі для розрахунку струмів і напруг у струмоведучих жилах та електромагнітних екранах трифазних кабельних ліній (КЛ) однофазного виконання з СПЕ ізоляцією для нормальних і аварійних режимів роботи потрібно враховувати способи заземлення екранів кабелю. При заземленні екранів кабелю з двох сторін виникають струми індукції, що призводить до появи значних поздовжніх струмів, що супроводжуються втратами енергії, в свою чергу це призводить до зниження пропускної спроможності КЛ. Найбільш дієвим способом обмеження поздовжніх струмів в екранах є транспозиція, що знижують струми до десятків ампер. При збільшенні довжини КЛ в вузлах транспозиції виникає збільшення діючого значення напруги, яка може перевищувати допустиму електричну міцність ізоляції, зниження якої досягається збільшенням кількості циклів транспозиції [103–106].

#### **3.1 Урахування індукованих струмів у трифазних колах із електромагнітними зв'язками**

Заземлення екранів кабелю є дуже важливим аспектом, без нього індукована ЕРС напруги буде генеруватися в його екранах, викликаючи перенапруження в ізоляції, знижують надійність її роботи.

В роботі однофазний кабель з двостороннім заземленням екранів можна представити двома взаємозв'язаними контурами. Тому, струм що

протікає в жилі за рахунок взаємної індукції між жилою і екраном індукуює в ньому струм [14, 107]. Якщо не вживати спеціальних заходів, то величина струму, що протікає в екрані кабелю, може бути порівнянна з струмом в жилі [103, 104, 108].

Проведемо аналіз з поясненням механізму появи струму в екранованих одножильних кабелях. На підставі робіт [14, 81, 106] представлена трифазна система, що складається з трьох одножильних екранованих кабелів (рис. 3.1).

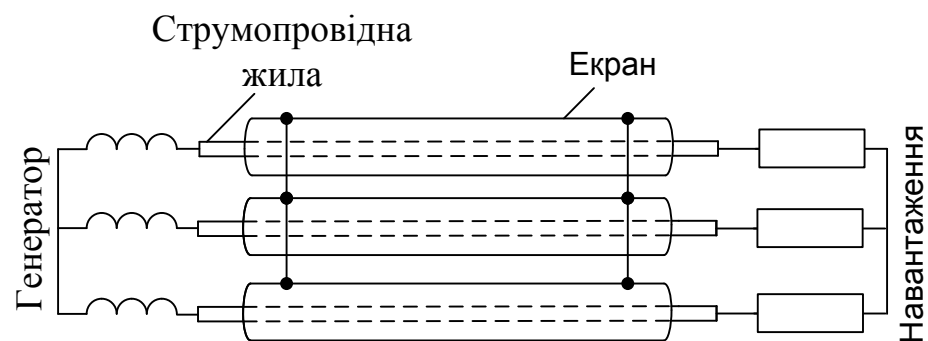


Рисунок 3.1 – Трифазна система яка складається з трьох одножильних екранованих кабелів

Екранами в кабелях можуть бути: алюмінієва або мідна оболонка. На кінцях одножильних кабелів екрани всіх фаз з'єднуються між собою і заземлені з умови техніки безпеки. Однак не заземлення екранів призводить до появи струмів, а з'єднання екранів між собою. Розглянемо варіант без заземлення екранів, але з їх з'єднанням між собою на кінцях лінії. Для спрощення математичного виведення, але зі збереженням фізичного сенсу виберемо час  $t_1$ , коли напруга на фазі В (рис. 3.2) дорівнює нулю, а між фазами А і С - лінійному.

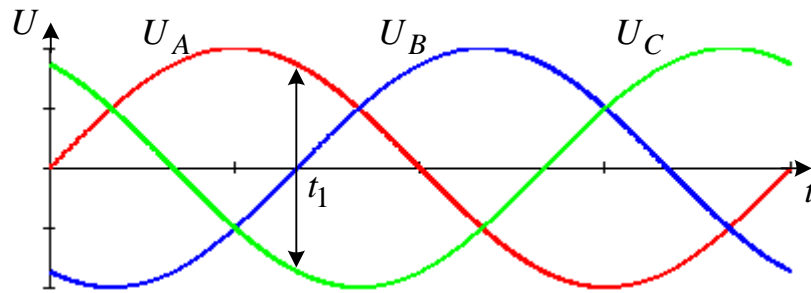


Рисунок 3.2 – Напруга на фазах

Представивши екран як провідник у вигляді замкнутого контуру (рис.3.3), розташованого на відстані  $r_E$  від жили до екрану кабелю, на відстані  $h$  від жили до сусіднього кабелю.

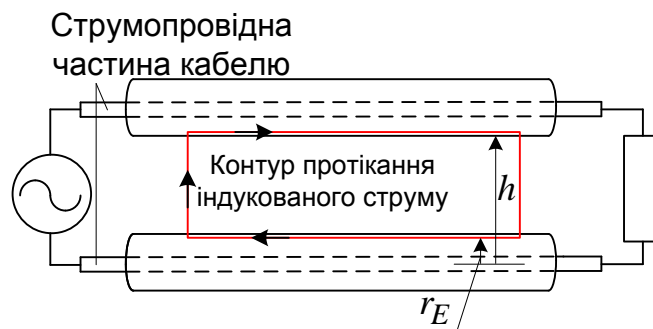


Рисунок 3.3 – Схематичне представлення екрана провідником

Струми, що протікають в жилі та в екрані можна представити як струми двох умовних контурів, що показані на рис. 3.4. Струм жили  $I_{\text{ж}}$ , протікаючи по контуру 5-6-7-8, створює навколо провідників змінне магнітне поле. В силу того, що відстань між точками 5-6 набагато більше, ніж між точками 5-8, будемо розглядати тільки магнітне поле, створюване провідниками 5-6 і 7-8. Вектор магнітної індукції  $B$ , пронизує контур 1-2-3-4 і викликає в ньому протікання струму  $I_e$ .



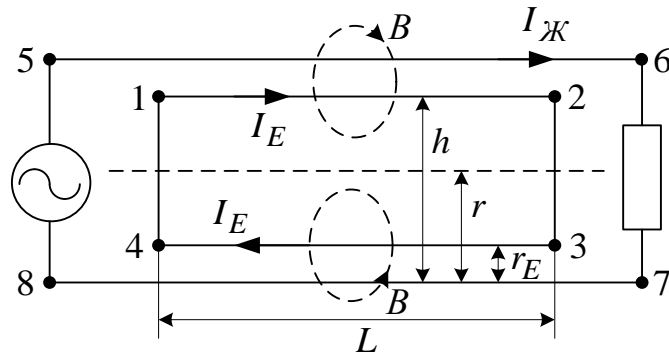


Рисунок 3.4 – Еквівалентна схема

Магнітний потік, який пронизує контур 1-2-3-4, дорівнює потокозчепленню, так як контур має тільки один виток:

$$\Psi = \oint_S B dS \quad (3.1)$$

де  $S$  – площа контура 1–2–3–4. По довжині контуру  $L$  магнітна індукція  $B$  не змінюється, тому можна записати:

$$\Psi = L \int_{r_E}^h B dr \quad (3.2)$$

де  $r_E$  – радіус екрана,  $h$  – відстань від жили до сусіднього екрана.

Підставимо  $B = \mu \mu_0 H$ , де  $\mu$  – магнітна проникність,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна; розпишемо  $H = I_{\text{Ж}} / 2\pi r$ . Далі підставимо  $B$  та  $H$  у формулу (3.2):

$$\Psi = L \int_{r_E}^h \frac{1}{2\pi r} \mu \mu_0 dr \quad (3.3)$$

Виносимо з під знака інтеграла величини, що не залежать від радіуса, і про інтегруємо (3.3):

$$\Psi = \frac{LI\mu\mu_0}{2\pi} \int_{r_E}^h \frac{dr}{r}, \quad \Psi = \frac{LI\mu\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_E} \quad (3.4)$$

За визначенням коефіцієнтів взаємної індукції між контуром 5-6-7-8 і контуром 1-2-3-4:  $M=\Psi/I$  та підставимо його у (3.4), отримаємо:

$$M = \frac{L\mu\mu_0}{2\pi} \ln \frac{h}{r_E} \quad (3.5)$$

В контурі за рахунок взаємної індуктивності наводиться ЕРС:

$$\dot{E} = -M \frac{d\dot{I}}{dt} \quad (3.6)$$

Запишемо

$$\dot{E} = E_m e^{j\omega t}, \quad (3.7)$$

$$\dot{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (3.8)$$

де  $E_m$  та  $I_m$  – амплітудні значення ЕРС і струму.

Візьмемо похідну виразу (3.8)

$$\frac{d\dot{I}}{dt} = j\omega I_m e^{j\omega t}, \quad (3.9)$$

і підставимо (3.6) в (3.9), одержуємо:

$$E_m e^{j\omega t} = -M j\omega I_m e^{j\omega t}$$

або

$$E_m = -M j\omega I_m$$

Замінімо  $I=I_{\text{Ж}}$  і отримаємо формулу (3.10) для жили 1-2, така ж ЕРС виникне від жили 3-4, отже, загальна ЕРС буде мати вигляд:

$$E = -j\omega M I_{\text{Ж}} \quad (3.10)$$

Струм екрану  $I_E$  так само створює ЕРС, тому

$$E = -2j\omega M (I_{\text{Ж}} + I_E) \quad (3.11)$$

Струм  $I_E$  викликає падіння напруги в екрані рівне  $2I_E R_E$ . Тоді за законом Кірхгофа

$$-2j\omega M (I_{\text{Ж}} + I_E) + 2I_E R_E = 0 \quad (3.12)$$

Із рівняння (3.12) виражаємо  $I_E$

$$I_E = \frac{I_{\text{Ж}} j\omega M}{R_E - j\omega M} \quad (3.13)$$

Звідки модуль струму

$$I_E = \frac{I_{\text{Ж}} j\omega M}{R_E - j\omega M} \quad (3.14)$$

Отже, в трифазних системах, що містять одножильні кабелі, поздовжні струми в екранах виникають в разі з'єднання екранів між собою на кінцях лінії, що призводить до індукування струмів в екранах кабелю, порівнянні за величиною з струмами жили.

Для зниження струмів в екранах в нормальному режимі і при коротких замиканнях, буде достатньо застосування одного повного циклу транспозиції. Однак в ряді випадків, при збільшенні допустимого напруги  $U_E$ , може знадобитися збільшення кількості вузлів і повних циклів транспозиції. Число циклів транспозиції визначається виходячи із розрахунку напруги на ньому і його порівнянні з допустимою напругою  $U_{E,\text{доп}}$  для екрана кабелю.

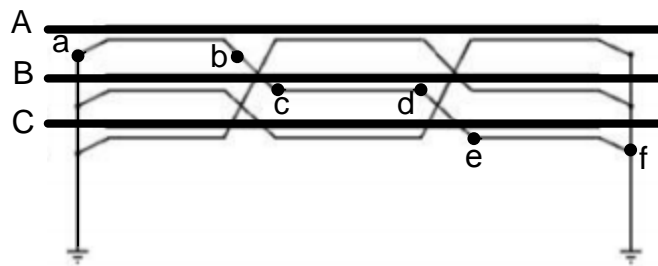


Рисунок 3.5 – Схема заземлення екранів кабелю з транспозицією екранів

Для зменшення значень поздовжніх струмів що протікають через екрани однофазних кабелів трифазної системи застосовується електромагнітна компенсація із застосуванням транспозиції екранів (рис.3.5), де сума ЕРС, що наводяться в екранах трьох секцій транспозиції (контур  $a-b-$

$c-d-e-f$ ), дорівнює нулю в наслідок зсуву ЕРС на  $120^\circ$  (рис.3.6) і тому поздовжні струми в нормальному режимі в екрані не протікають.

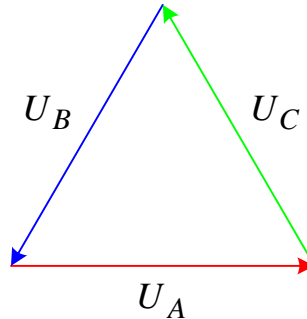


Рисунок 3.6 – Векторна діаграма суми ЕРС, що наводяться в екранах трьох секцій транспозиції

У разі несиметрії фаз, сума ЕРС не дорівнюватиме нулю, що призведе до появи струму через екран кабелю і викличе додатковий нагрів ізоляції.

### **3.2 Електричні схеми заміщення трифазних високовольтних кабельних ліній, як електричних кіл із міжфазними зв'язками**

Однорідну лінію можна розглядати як однорідну ланцюгову схему з нескінченно великим числом елементарних ланок (рис.3.7). Тому наближено, можна лінію кінцевої довжини замінити ланцюговою схемою з кінцевим числом ланок, які мають кінцеві значення параметрів.

Ці міркування мають дуже велике значення для моделювання ліній. Для експериментального вивчення в лабораторних умовах процесів в довгих лініях, а також процесів в різних системах, з'єднаних довгими лініями, зазвичай лінії замінюють еквівалентними їм ланцюговими схемами. Точність моделювання буде тим більше, чим більше число ланок буде містити ланцюгова схема.

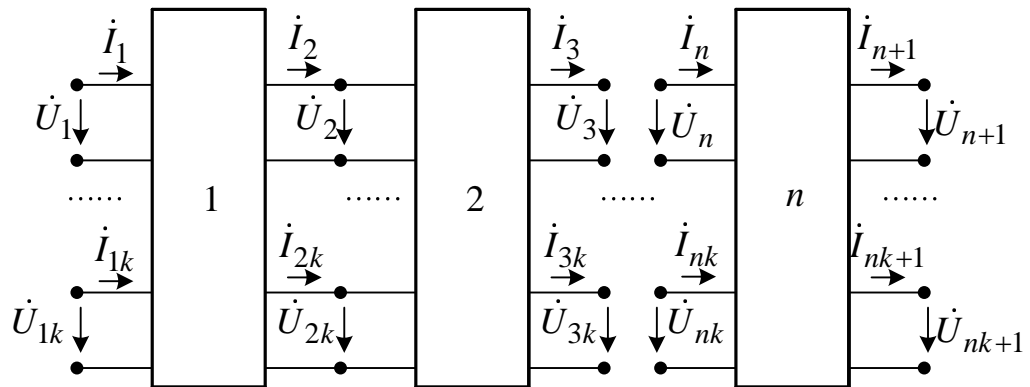


Рисунок 3.7 – Ланцюгова схема заміщення ділянки лінії

Однієї ланки, що заміняє лінію, досить, якщо потрібно розраховувати та аналізувати співвідношеннями між напругою і струмами тільки на початку і в кінці лінії і тільки при одній частоті усталеного синусоїдального режиму. Для дослідження напруги і струму тільки на початку і в кінці лінії, але при різних частотах, для різних гармонік несинусоїдальних струмів і напруг, проводити моделювання всієї лінії одною Т- або П-образною ланкою вже недостатньо.

Моделювати лінію ланцюгової схемою з достатнім числом ланок необхідно при аналізі розподілу напруги і струму вздовж лінії. Вибір числа ланок в моделі лінії залежить від тих завдань, які ставляться при дослідженні. Здебільшого буває досить взяти 10–20 ланок [1–5].

### 3.2.1 Особливості дослідження перехідних процесів у ланцюгових схемах заміщення трифазних кабельних ліній

Відомі моделі розрахунку перехідних процесів в колах з розподіленими параметрами за допомогою системи телеграфних рівнянь з початковими і граничними умовами. В ряді випадків їх аналітичне рішення і подальший

аналіз представляє собою громіздку задачу та на практиці малозастосовна. Досить часто, при складанні фізичних моделей і моделюванні за допомогою спеціальних комп'ютерних програм для розрахунку перехідних процесів, доцільно використовувати ланцюгові схеми заміщення кола з розподіленими параметрами [21, 22, 109, 110, 111].

Розглянута однорідна пасивна ланцюгова схема заміщення ділянки лінії з розподіленими параметрами, вважається, що складається з однакових ланок, всередині яких не діють ЕРС (рис. 3.8).

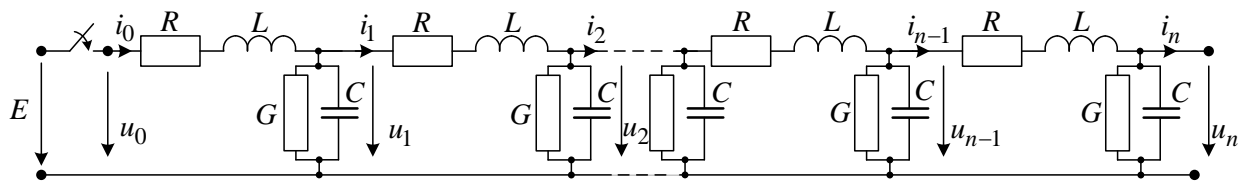


Рисунок 3.8 – Однорідна пасивна ланцюгова схема заміщення ділянки лінії з розподіленими параметрами

Зображення напруги і струму, для  $k$ -ї ланки, при нульових початкових умовах запишемо як рівняння скінченних різниць щодо невідомих  $\bar{u}_k$  та  $\bar{i}_k$ , що залежать від цілочисельної змінної  $k$

$$\begin{aligned}\bar{u}_k &= \bar{u}_{k+1} + z_1 \bar{i}_k \\ \bar{i}_k &= \bar{i}_{k+1} + \frac{\bar{i}_{k+1}}{z_2}\end{aligned}\quad (3.15)$$

де  $z_1 = R + pL$  и  $z_2 = G + 1/pC$  – операторні опори відповідно поздовжніх і поперечних елементів ланцюгової схеми.

Згідно [18] зображення напруги на вході  $k$ -ї ланки і струму в залежності від величини  $\bar{u}_0$  та  $\bar{i}_0$ , записуються

$$\begin{aligned}\bar{u}_k &= \frac{\operatorname{ch}(k-0.5)\nu}{\operatorname{ch}0.5\nu} \bar{u}_0 - \frac{z_1 \operatorname{sh}k\nu}{\operatorname{sh}\nu} \bar{i}_0 \\ \bar{i}_k &= \frac{\operatorname{ch}(k-0.5)\nu}{\operatorname{ch}0.5\nu} \bar{i}_0 - \frac{\operatorname{sh}k\nu}{z_2 \operatorname{sh}\nu} \bar{u}_0\end{aligned}\quad (3.16)$$

Зручніше користуватися виразами для  $\bar{u}_k$  та  $\bar{i}_k$ , які залежать від  $\bar{u}_k$  та  $\bar{i}_k$  – зображення напруги на виході  $n$ -ї ланки. У формулах (3.16), прийнявши  $k = n$ , після деяких перетворень, отримали:

$$\begin{aligned}\bar{u}_k &= \frac{\operatorname{ch}(n-k)\nu \bar{u}_0 + \operatorname{sh}k\nu \bar{u}_n}{\operatorname{sh}n\nu} \\ \bar{i}_k &= \frac{\operatorname{ch}(n-k-0.5)\nu \bar{u}_0 - \operatorname{ch}(k+0.5)\nu \bar{u}_n}{2z_2 \operatorname{sh}0.5\nu \operatorname{sh}n\nu}\end{aligned}\quad (3.17)$$

Якщо задані ЕРС, які прикладені до першої та останньої ділянок схеми, то формули (3.17) визначають зображення напруг і струмів будь-якої ділянки ланцюгової схеми.

В окремому випадку, при включенні на постійну ЕРС  $E$  і розімкнутій на кінці схемою ( $z=\infty$ ), зображення виразів (3.17) будуть:

$$\begin{aligned}\bar{u}_k &= E \frac{\operatorname{ch}(n-k+0.5)\nu}{\operatorname{ch}(n+0.5)\nu} \\ \bar{i}_k &= 2E \frac{\operatorname{sh}0.5\nu \operatorname{sh}(n-k)\nu}{z_1 \operatorname{ch}(n+0.5)\nu}\end{aligned}\quad (3.18)$$

Якщо прийняти  $1+z_1/2z_2=\operatorname{ch}\nu$ , то для величини  $\nu$  отримали рівняння:

$$\operatorname{ch}\nu = 1 + 0.5(R+pL)pC \quad (3.19)$$

Для знаходження оригіналів скористаємося теоремою розкладання, для цього знайдемо корені рівняння  $F_2(p)=\operatorname{ch}(n+0.5)\nu=0$ :

$$\nu_s = j\pi(s+0.5)(n+0.5), \quad (s=0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Відповідні значення  $p_s = -\delta \pm \omega_s$  знаходяться із рівняння

$$p_S^2 LC + p_S RC + 2 \left( 1 - \cos \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \right) = 0$$

де

$$\delta = \frac{R}{2L}, \omega_S = \sqrt{\left( \frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{2}{LC} \left( 1 + \cos \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \right)} \quad (3.20)$$

Диференціюємо рівняння (3.6) по  $p$ , знайдемо

$$\operatorname{sh} \nu \frac{d\nu}{dp} = 0.5 RC \left( 1 + \frac{2L}{R} p \right),$$

звідки

$$p \frac{dF_2(p)}{dp} = (n+0.5) \operatorname{sh}(n+0.5)\nu \frac{\left( 1 + \frac{2L}{R} p \right) RC}{2 \operatorname{sh} \nu},$$

тому при  $p=p_S$

$$p_S \frac{dF_2(p)}{dp} \Big|_{p=p_S} = -(n+0.5) \frac{(-1)^S LC}{\sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi} \omega_S (\omega_S \pm j\delta).$$

Так як  $\nu_n = j\pi$  не є полюсом функцій  $\bar{u}_k$  та  $\bar{i}_k$ , так само різним полюсами цих функцій відповідають величини  $s$ , рівні  $0, 1, 2, \dots, n-1$ . При  $s > 1$  значення  $p_n$ , що відповідають кореням рівняння  $F_2(p) = 0$ , починають повторюватись, як це видно з формули (3.20). Тому вираз для  $u_k$  буде

$$\frac{u_k}{E} = 1 - \frac{1}{(n+0.5)LC} \sum_{s=0}^{n-1} \left( A_s e^{(-\delta + j\omega_s)t} + A_s^* e^{(-\delta + j\omega_s)t} \right)$$

де

$$A_s = \frac{(-1)^S \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \cos(n-k+0.5) \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi}{\omega_S (\omega_S + j\delta)},$$

$A_s^*$  – комплексне значення, яке спряжене з комплексом  $A_s$ .



Після деяких перетворень отримуємо:

$$\frac{u_k}{E} = 1 - \frac{2e^{-\delta t}}{(n+0.5)LC} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi k \cos \omega_S t + \frac{\delta}{\omega_S} \sin \omega_S t \quad (3.21)$$

Аналогічно знайдемо вираз для струму  $k$ -ї ланки. Для знаходження оригіналів знайдемо корені рівняння  $F_2(p) = (R+pL)\operatorname{ch}(n+0.5)v = 0$ :

$$p_n = -(R/L); p_s = -\delta \pm \omega_S \quad (s=0, \pm 1, \pm 2, \dots, n-1).$$

Далі знаходимо:

$$p \frac{dF_2(p)}{dp} = (n+0.5) p R C (R+pL) \left( 1 + \frac{2L}{R} p \right) \frac{\operatorname{sh}(n+0.5)v}{2\operatorname{sh} v} + p L \operatorname{ch}(n+0.5)v$$

значення  $p = -(R/L)$  не є полюсом зображення  $\bar{i}_k$ , тому

$$i_k = -4Ee^{-\delta t} \sum_{s=0}^{n-1} \left( B_s e^{j\omega_S t} + B_s^* e^{-j\omega_S t} \right)$$

де

$$B_s = \frac{(-1)^s \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \sin(n-k) \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi}{(n+0.5)RL(R+L(-\delta+j\omega_S)) \left( 1 + \frac{2L}{R}(-\delta+j\omega_S) \right) (-\delta+j\omega_S)},$$

$B_s^*$  – комплексне значення, яке спряжене з комплексом  $B_s$ .

Після перетворень отримали:

$$i_k = \frac{4Ee^{-\delta t}}{L(n+0.5)} \sum_{s=0}^{n-1} \cos \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \cos(k+0.5) \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \frac{\sin \omega_S t}{\omega_S} \quad (3.22)$$

Порівнюючи складові величини  $\omega_S$ , порівняно з  $\frac{2}{LC} \left( 1 - \cos \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \right)$ ,

зроблено висновок, що значенням  $\delta^2$  можна знехтувати, тоді

$$\omega_s \approx \frac{2}{\sqrt{LC}} \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2}$$

У формулах (3.21) та (3.22) знехтуємо величиною  $\delta^2$ , отримуємо розрахункові зображення для напруги і струму на вході  $k$ -ї ділянки схеми

$$u_k = E \left[ 1 - \frac{e^{-\delta t}}{(n+0.5)LC} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \sin \frac{k(s+0.5)}{n+0.5} \pi \cos \omega_s t \right] \quad (3.23)$$

$$i_k = \frac{Ee^{-\delta t}}{n+0.5} \sqrt{\frac{L}{C}} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \cos(k+0.5) \frac{s+0.5}{n+0.5} \pi \sin \omega_s t \quad (3.24)$$

**3.2.2 Вибір кількості ланок схеми заміщення із зосередженими параметрами при аналізі перехідних процесів в трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками**

Для аналізу напруги на кінці реальної лінії з розподіленими параметрами  $u(l, t)$ , скористаємося виразом (3.18) при  $k = n \rightarrow \infty$ . З урахуванням теореми запізнення, отримали

$$\begin{aligned} \bar{u}(l, p) &= \frac{E}{\operatorname{ch} pl \sqrt{L_l C_l}} = \frac{2E}{e^{pl \sqrt{L_l C_l}} + e^{-pl \sqrt{L_l C_l}}} = \\ &= 2E \left( e^{-pl \sqrt{L_l C_l}} - e^{-3pl \sqrt{L_l C_l}} + e^{-5pl \sqrt{L_l C_l}} \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Ця функція може бути отримана накладенням нескінченного числа функцій, у тому числі першої, яка є функцією Хевісайда  $\sigma_0(t)$  [5, 7].

Відповідний оригінал має вигляд

$$u(l,t) = 2E \left[ \sigma_0 \left( t - l\sqrt{L_l C_l} \right) - \sigma_0 \left( t - 4l\sqrt{L_l C_l} \right) + \sigma_0 \left( t - 5l\sqrt{L_l C_l} \right) \right] \quad (3.26)$$

Для побудови графіка зміни напруги в кінці ланцюгової схеми заміщення при включенні її на постійну ЕРС, скористаємося математичним програмним пакетом MathCAD.

Щоб побудувати графік, що не залежить від вхідної напруги і параметрів лінії, введемо нову змінну, яка враховує час і параметри лінії:

$$T' = \frac{t}{l\sqrt{L_l C_l}}$$

Тоді можна записати

$$u(T') = 2E \left[ \sigma_0(T' - 1) - \sigma_0(T' - 3) + \sigma_0(T' - 5) \right]$$

В отриманий вираз входить сума нескінченного ряду, член з номером  $s=0,1,2,\dots$ , який можна записати як  $(-1)^s \sigma_0(T' - 2s - 1)$ .

Кожен член ряду приймає значення 0 при  $T' < s$ , а в іншому випадку 1, або -1. Отже, ряд не збігається, і необхідно обмежити кількість доданків. Це визначається максимальним значенням  $T'$ , заданим при побудові графіка. Для цього достатньо прийняти зміну  $s$  від 0 до цілого додатного числа, обраного з умови  $T'_{max} - 2s - 1 \leq 0$ , або  $s \geq 0.5(T'_{max} - 2s - 1)$ .

З огляду на вище сказане, отримуємо вираз для побудови кривих напруги (рис. 3.9), в кінці лінії з розподіленими параметрами, розрахованої за формулою (3.26).

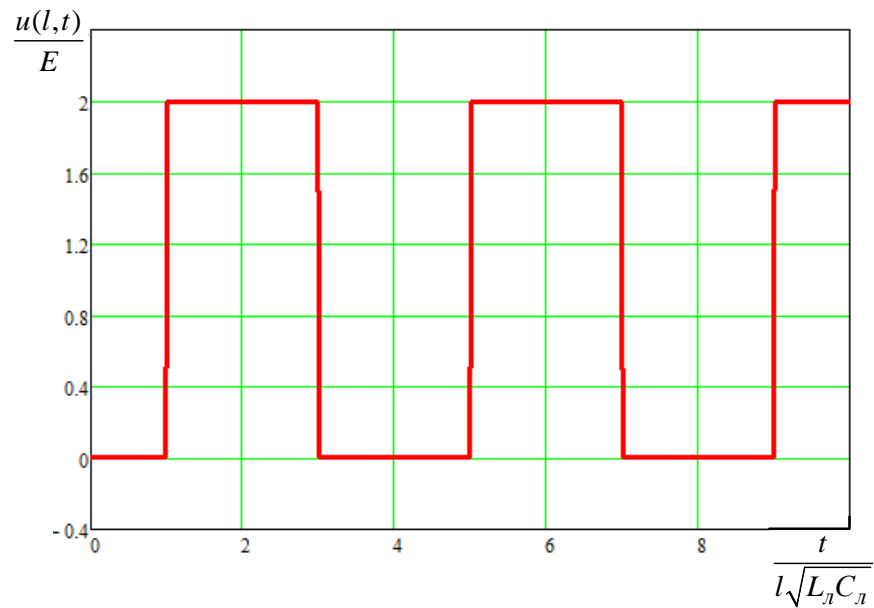


Рисунок 3.9 – Крива напруги в кінці реальної лінії

Порівняємо вираз (3.23) з виразом для напруги на кінці розімкнутої реальної лінією з розподіленими параметрами (3.26).

Лінія з розподіленими параметрами моделюється однорідної ланцюгової схемою, що містить  $n$  однакових ланок. Наближена формула, що описує закон зміни напруги в кінці штучної лінії:

$$u_n = E \left[ 1 - \frac{1}{n+0.5} \sum_{s=0}^{n-1} \operatorname{ctg} \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \sin \frac{n(s+0.5)}{n+0.5} \pi \cos \omega_s t \right] \quad (3.27)$$

$$\text{де } \omega_s = \frac{2}{\sqrt{LC}} \sin \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2}.$$

Для побудови функції (3.27) в MathCAD перетворимо формулу таким чином, щоб при побудові графіка виключити залежність від параметрів  $L_l$ ,  $C_l$  штучної лінії. З огляду на те, що змінна  $t$  входить в якості аргументу тільки в тригонометричну функцію косинуса, як один із співмножників, запишемо

$$\omega_{st} = \frac{2t}{\sqrt{LC}} \sin \left( \frac{s+0.5}{n+0.5} \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.28)$$

Щоб скористатися виразом (3.15) при побудові функції (3.27), необхідно задати для неї змінні  $T''$ ,  $s$ ,  $n$ . З цією метою перепишемо вираз (3.15) у вигляді функції

$$\omega_{St}(T'', s, n) = 2nT'' \sin\left(\frac{s + 0.5}{n + 0.5} \frac{\pi}{2}\right)$$

де  $T'' = t / n\sqrt{LC}$ .

Таким чином, для побудови кривої напруги на вході ланцюгової схеми заміщення (3.27) в MathCAD, скористаємося функцією  $u_n/E$ , з аргументами  $T''$  за часом і кількістю ланок  $n$  штучної лінії

$$\frac{u_n}{E}(T, n) := 1 - \frac{1}{1 + n + 0.5} \cdot \sum_{s=0}^{n-1} \left[ \cot\left(\frac{s + 0.5}{n + 0.5} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left[\frac{n \cdot (s + 0.5)}{n + 0.5} \cdot \pi\right] \cdot \cos(\beta_{st}(T, s, n)) \right]$$

На рис. 3.10 наведені криві напруги в кінці ланцюгової схеми заміщення  $u_n$ , побудовані в залежності від величини  $\frac{t}{l\sqrt{L_l C_l}}$  для різного числа ланок  $n$ .

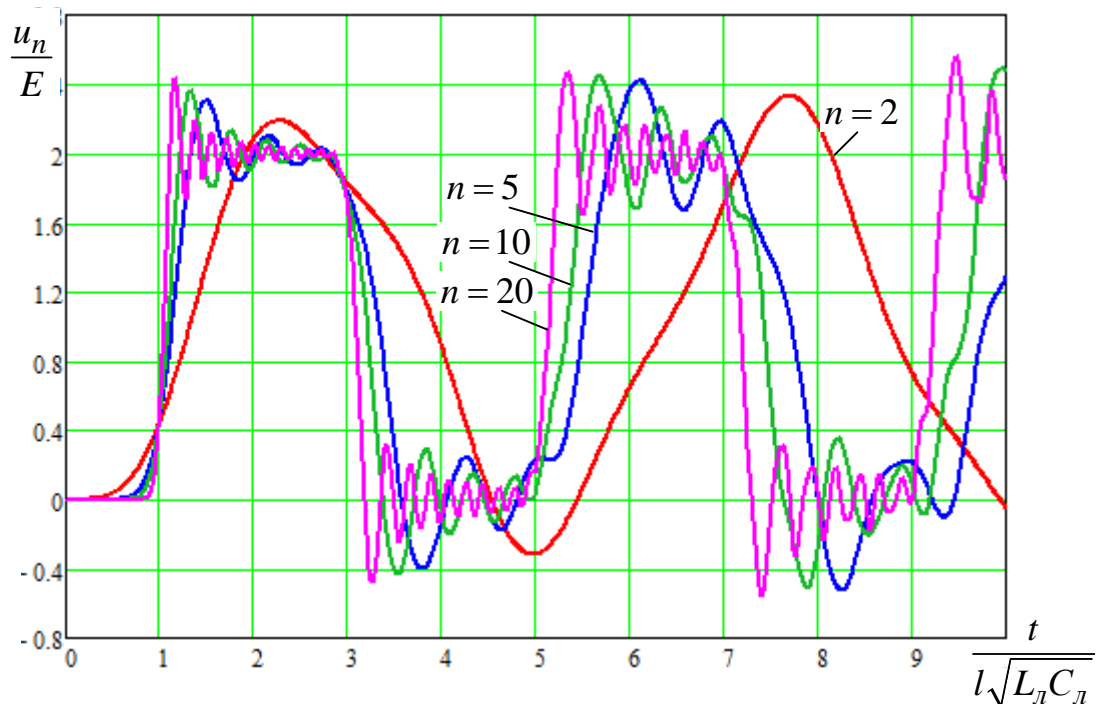


Рисунок 3.10 – Криві напруги в кінці штучної лінії

З порівняння наведених кривих рис.3.9 і рис 3.10 видно, що при числі ланок  $n \geq 10$  напруга в кінці ланцюгової схеми заміщення і ліній з розподіленими параметрами задовільно збігаються один з одним.

### **3.3 Математична модель трифазної високовольтної кабельної лінії, як електричної схеми з багатополюсними елементами**

Останнім часом в теорії лінійних кіл широке застосування знайшло подання будь-якої схеми у вигляді з'єднання  $n$ -полюсних елементів ( $n \geq 2$ ). З появою сучасних обчислювальних програмних засобів і їх широке застосування для вирішення складних математичних задач, топологічні методи розрахунку складних електричних кіл отримали нові напрямки розвитку.

Аналіз довільного електричного кола, який заснований на перетворенні її на елементи. В якості складового елемента вибирають деяку частину кола, електричний зв'язок якої з іншою частиною проводиться через  $n$  затискачів. Виділену частину кола прийнято називати багатополюсним елементом або  $n$ -полюсником, а затискачі – полюсами даного  $n$ -полюсника [2–4].

У сучасній теорії багатополюсників виділяються два найбільш загальних класу багатополюсників: це  $(p + 1)$ -полюсник, що отримали назву (multiterminal), і  $2xn$ -полюсника, що визначаються як коло з  $n$  входами (multiport) [112–114].

З причин практичності визначення змінних на парах затискачів найбільш прийнятним в теорії електричних кіл є  $2xn$ -полюсник. Однак, в ряді випадків використання  $(p + 1)$ -полюсника дозволяє простіше формулювати теоретичні і практичні завдання. Зокрема це відноситься до багатополюсника, які можна описати матрицями провідностей.

На основі положення теорії багатополіусників [112, 115–117] поняття  $(p + 1)$ -поліусника і  $2 \times n$ - поліусника об'єднані в поняття кола, що розглядається по відношенню до  $n$  пар своїх поліусів (рис. 3.11), не обов'язково різних, і задається векторами

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]_t$$

$$i(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)]_t$$

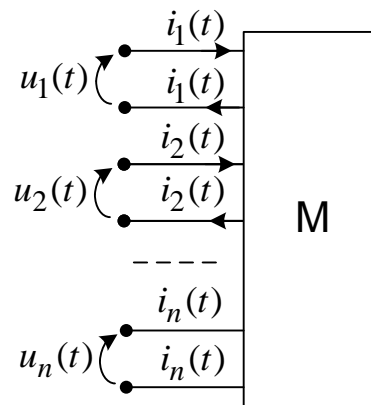


Рисунок 3.11 – Багатополіусник, який складається з  $M$  поліусів

Елемент  $M$  задається у формі:  $[u, i]_{t_0}^{t_1}$ , де – множина  $n$  вектор-функцій, які диференціюються і рівні нулю в деякій точці інтервалу  $[t_0, t_1]$ . Математична модель кола визначається

$$\{[u, i]_{t_0}^{t_1}\} = M$$

В роботі використовується форма рівняння багатополіусника у вигляді явних функцій по відношенню до окремих груп струмів і напруг

$$A_1 = A_{10} + BA_2 \quad (3.29)$$

де  $A_1$  – вектор  $n$  струмів або напруг, обраних в якості первинних параметрів;  $A_2$  – вектор  $n$  струмів або напруг, обраних в якості вторинних параметрів;  $A_{10}$  – вектор автономних параметрів;  $B$  – матриця неавтономних параметрів багатополюсника. Рівняння (3.29) називають загальним рівнянням багатополюсника [118, 119].

Кожний пасивний лінійний  $2n$ - полюсник можна представити у формі (3.29), де показано, що будь-який пасивний  $2n$ - полюсник може бути представлений у вигляді

$$\begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ \vdots \\ A_{1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \cdots & \cdots \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ B_{n1} & \cdots & \cdots & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{21} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ \vdots \\ A_{2n} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

На підставі вищесказаного, представлена математична модель трифазної кабельної лінії в загальному вигляді, відповідно (3.30). В даному випадку  $n = 6$ , що відповідає трьом жилах і трьом екранам трифазної кабельної лінії однофазного виконання. У нашому випадку математична модель описується в вигляді дванадцятиполюсника (рис. 3.12), між якими існує взаємна індуктивність – не відображено на цьому малюнку.

Елемент кабельної лінії рис. 3.12, математично можна представити як пасивний багатополюсник, який задається матрицями однією з полюсних змінних  $u_n$  або  $i_n$ , які входять в вектор первинних, а інша в вектор вторинних змінних.



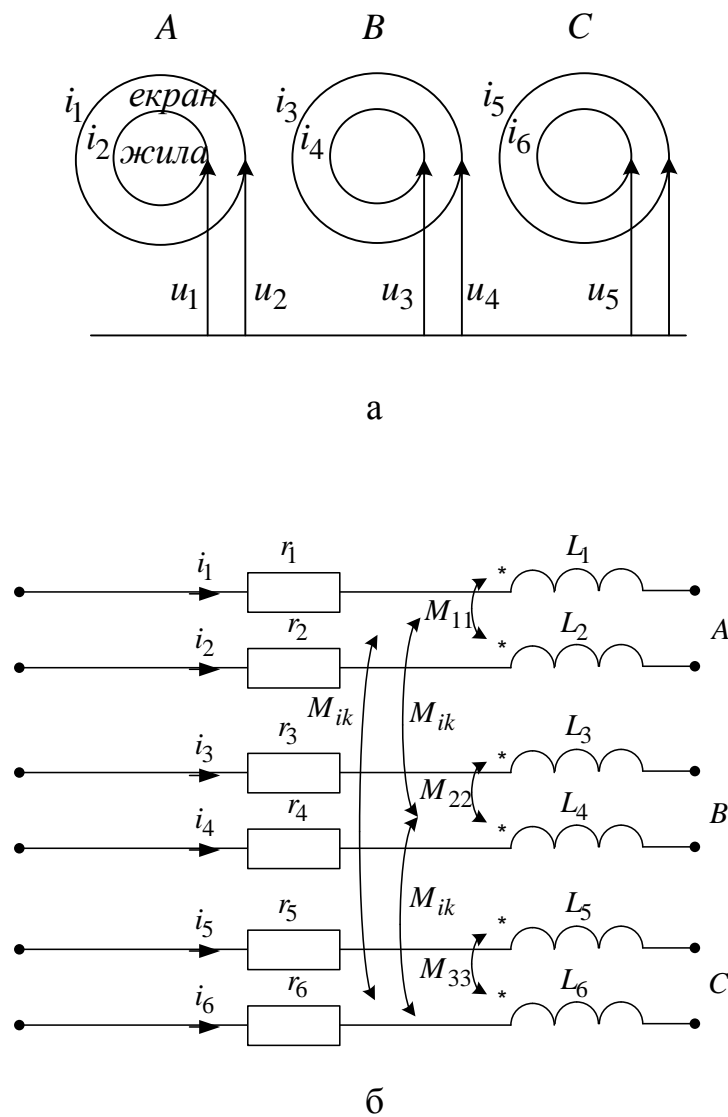


Рисунок 3.12 – Елемент кабельної лінії з  $n=6$  провідниками

а) позначення падінь напруги та струмів у жилах та екранах трифазного кабелю; б) електрична схема заміщення елемента лінії

Матриця багатополюсника по напрузі, де  $u_n$  виступає у вигляді вектора первинних змінних

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + L_{11} & r_0 + M_{12} & r_0 + M_{13} & r_0 + M_{14} & r_0 + M_{15} & r_0 + M_{16} \\ r_0 + M_{21} & r_2 + L_{22} & r_0 + M_{23} & r_0 + M_{24} & r_0 + M_{25} & r_0 + M_{26} \\ r_0 + M_{31} & r_0 + M_{32} & r_3 + L_{33} & r_0 + L_{34} & r_0 + M_{35} & r_0 + M_{36} \\ r_0 + M_{41} & r_0 + M_{42} & r_0 + M_{43} & r_4 + L_{44} & r_0 + M_{45} & r_0 + M_{46} \\ r_0 + M_{51} & r_0 + M_{52} & r_0 + M_{53} & r_0 + M_{54} & r_5 + L_{55} & r_0 + M_{56} \\ r_0 + M_{61} & r_0 + M_{62} & r_0 + M_{63} & r_0 + M_{64} & r_0 + M_{65} & r_6 + L_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}$$

де  $r_i, i=1, \dots, n$  – активний опір  $i$ -го провідника;  $r_0$  – активний опір землі;  $L_{ij}$  – власна індуктивність каналу, який утворюється  $i$ -м провідником та землею як зворотній провід;  $M_{ik}$  – взаємна індуктивність двох каналів провід-земля.

Матриця багатоподюсника для струму, де  $i_n$  – вектор первинних параметрів

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^6 (G_{1k} + C_{1k}) & -G_{12} - C_{12} & -G_{13} - C_{13} & -G_{14} - C_{14} & -G_{15} - C_{15} & -G_{16} - C_{16} \\ -G_{21} - C_{21} & \sum_{k=1}^6 (G_{2k} + C_{2k}) & -G_{23} - C_{23} & -G_{24} - C_{24} & -G_{25} - C_{25} & -G_{26} - C_{26} \\ -G_{31} - C_{31} & -G_{32} - C_{32} & \sum_{k=1}^6 (G_{3k} + C_{3k}) & -G_{34} - C_{34} & -G_{35} - C_{35} & -G_{36} - C_{36} \\ -G_{41} - C_{41} & -G_{42} - C_{42} & -G_{43} - C_{43} & \sum_{k=1}^6 (G_{4k} + C_{4k}) & -G_{45} - C_{45} & -G_{46} - C_{46} \\ -G_{51} - C_{51} & -G_{52} - C_{52} & -G_{53} - C_{53} & -G_{54} - C_{54} & \sum_{k=1}^6 (G_{5k} + C_{5k}) & -G_{56} - C_{56} \\ -G_{61} - C_{61} & -G_{62} - C_{62} & -G_{63} - C_{63} & -G_{64} - C_{64} & -G_{65} - C_{65} & \sum_{k=1}^6 (G_{6k} + C_{6k}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

де  $C_{ii}, G_{ii}$  – ємність та провідність між  $i$ -м провідником та землею;  $C_{ik}, G_{ik}$  – часткова ємність та провідність між  $i$ -м та  $k$ -м провідниками (Не показані на рисунку).

Практичне застосування підходу передбачає подання багатополюсних елементів схемами заміщення, пов'язаних з обмеженням на розміру схеми, яка аналізується, числами незалежних елементів кола, а також проблемами розробок схем заміщення в якості математичної моделі елемента системних параметрів багатополюсника. Зменшення розмірів аналізованої системи зі

збереженням багатополюсників кола досягається використанням ланцюгових схем заміщення, що дозволяє аналізувати кола з багатополюсними елементами з метою створення єдиного підходу до аналізу і проектування електричних кіл у вигляді високовольтних кабельних ліній електропередачі і підвищення ефективності їх розрахунку із застосуванням програмних обчислювальних засобів [105, 120, 121].

### **3.4 Ланцюгова схема заміщення трифазної кабельної лінії та її реалізація в програмі Matlab/Simulink**

Для вирішення різних практичних задач при моделюванні кабельної лінії електропередачі, для дослідження нормальних і перехідних режимів використовується ланцюгова схема заміщення ділянки лінії, що складається з симетричних Т або П-схем багатополюсників, з'єднаних каскадом. На етапах представлення лінії ланцюгової схемою, виникає ряд складнощів, а саме врахування струмів, індукованих в екранах, що призводить до появи перенапруг, які призводять до пошкодження ізоляції лінії.

Взаємні індуктивності і ємності між проводами фаз залежать від взаємного розташування в просторі, що ускладнює моделювання і розрахунок робочих та аварійних режимів трифазного кабельної лінії електропередачі. У деяких випадках наведені ЕРС взаємоіндукції в окремих фазах не являються симетричними, що в ряді випадків призводить до порушення симетричності системи.

У даній роботі найбільш раціональним, для моделювання нормальних, аварійних режимів роботи і аналізу перехідних електромагнітних процесів, є застосування теорії багатополюсників.

### 3.4.1 Визначення параметрів схеми заміщення моделі трифазної лінії з однофазними кабелями

Розрахункові вирази для параметрів однофазного кабелю можна отримати, ґрунтуючись на відомих формулах для власних погонних активно-індуктивних опорів многопровідної системи дрiт – земля [19, 93, 100, 106]. При обчисленні ємнісних параметрів кабелю, приймається, що кабель прокладений під землею (глибина залягання в даному випадку не має значення).

Для точного розрахунку електричних параметрів кабелів  $Z$  з урахуванням взаємного впливу фаз, а також з урахуванням частотних залежностей цих параметрів, існують складні формули, вперше наведені в [19]. При виведенні формул для розрахунку погонних параметрів приймалися наступні припущення:

- кабельне лінія складається з металевих провідників, осі яких взаємно паралельні і паралельні поверхні землі;
- кабельне лінії уздовж своїх осей є однорідними;
- при аналізі процесів в лініях можливо нехтувати поширенням електричного поля в радіальному напрямку в землі.

У разі розташування однофазних кабелів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в ряд, використання середньо геометричної відстані між фазами призводить до втрати специфічних особливостей, властивих «крайнім» і «середнім» фазам. Без урахування ємнісних параметрів кабелю падіння напруги вздовж жил і екранів пов'язані з струмами в них системою рівнянь, що складається з 6 рівнянь щодо 6-ти напруг і 6-ти струмів:

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{U}_{жA} &= \underline{Z}_{ж} \dot{I}_{жA} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{KAB} (\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eB}) + \underline{Z}_{KAC} (\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \\
\Delta \dot{U}_{жB} &= \underline{Z}_{ж} \dot{I}_{жB} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{eB} + \underline{Z}_{KAB} (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eA}) + \underline{Z}_{KBC} (\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \\
\Delta \dot{U}_{жC} &= \underline{Z}_{ж} \dot{I}_{жC} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{eC} + \underline{Z}_{KAC} (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eA}) + \underline{Z}_{KBC} (\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eB}) \\
\Delta \dot{U}_{eA} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{жA} + \underline{Z}_{KAB} (\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eB}) + \underline{Z}_{KAC} (\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \\
\Delta \dot{U}_{eB} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eB} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{жB} + \underline{Z}_{KAB} (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eA}) + \underline{Z}_{KBC} (\dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \\
\Delta \dot{U}_{eC} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eC} + \underline{Z}_{же} \dot{I}_{жC} + \underline{Z}_{KAC} (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eA}) + \underline{Z}_{KBC} (\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eB})
\end{aligned} \tag{3.31}$$

де  $\dot{I}_{eA}, \dot{I}_{eB}, \dot{I}_{eC}$  – струми в екранах кабелю для кожної фази  $A, B, C$ ;  $\dot{I}_{жA}, \dot{I}_{жB}, \dot{I}_{жC}$  – струми в жилах кабелю для кожної фази  $A, B, C$ ;  $\underline{Z}_{ж}$  – повний опір жили;  $\underline{Z}_e$  – повний опір екрану;  $\underline{Z}_{же}$  – повний взаємний опір між жилою і екраном одного кабелю;  $\underline{Z}_K$  – взаємний опір жили (екрану) і сусіднього кабелю.

Погонні поздовжні параметри представлені опорами  $\underline{Z}_1, \dots, \underline{Z}_7$ , формули для обчислення яких в діапазоні щодо низьких частот (одиниці тисяч Гц) представлені нижче.

Розрахунок погонних параметрів КЛ з урахуванням їх залежності від частоти і реального геометричного розташування в землі:

$$\begin{aligned}
m_{ж} &= e^{j\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_{ж}}} \\
m_e &= e^{j\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_e}} \\
m_3 &= e^{j\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_3}}
\end{aligned}$$

де  $\mu_0$  – абсолютна магнітна проникність вакууму;  $\rho_{ж}$  – питомий опір матеріалу.

Погонний активний опір і внутрішній індуктивний опір жили, що обумовлене електромагнітним полем в жилі

$$\underline{Z}_1 = \frac{m_{ж}\rho_{ж}}{2\pi \cdot r_1} \operatorname{cth}(r_1 m_{ж}) - \frac{\rho_{ж}}{2\pi \cdot r_1^2} \quad (3.32)$$

де  $r_1$  – зовнішній радіус жили.

Погонний зовнішній індуктивний опір жили, який визначається електромагнітним полем в ізоляції між жилою і екраном:

$$\underline{Z}_2 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.33)$$

де  $r_2$  – внутрішній радіус екрана.

Погонний активний і внутрішній індуктивний опір екрану, який визначається падінням напруги на внутрішній стороні екрану від струму, що повертається по жилі (канал жила-екран):

$$\underline{Z}_3 = \frac{m_e \rho_e}{2\pi} \operatorname{cth}(\Delta_e m_e) - \frac{\rho_e}{2\pi \cdot r_2 (r_2 + r_3)} \quad (3.34)$$

де  $\Delta_e = r_3 - r_2$ ;  $r_3$  – зовнішній радіус екрана.

Погонний взаємноіндуктивний опір між каналами жила-екран і екран-земля, яке визначається падінням напруги вздовж зовнішньої поверхні екрану при одиниці струму всередині жили:

$$\underline{Z}_4 = \frac{m_e \rho_e}{\pi (r_2 + r_3)} \operatorname{csc} h(\Delta_e m_e) \quad (3.5)5$$

де  $h$  – глибина залягання фаз кабелю.

Погонний активний і внутрішній індуктивний опір екрану, який визначається падінням напруги на зовнішній стороні екрану від струму, що повертається по землі (канал екран-земля):

$$\underline{Z}_5 = \frac{m_e \rho_e}{2\pi \cdot r_3} \operatorname{cth}(\Delta_e m_e) + \frac{\rho_e}{2\pi \cdot r_3 (r_2 + r_3)} \quad (3.36)$$

Погонний зовнішній індуктивний опір екрану, який визначається електромагнітним полем в ізоляції між екраном і землею:

$$\underline{Z}_6 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad (3.37)$$

де  $r_4$  – зовнішній радіус кабелю.

Погонний власний опір землі (як зворотний провід):

$$\underline{Z}_7 = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( -\ln \frac{1.781m_3r_4}{2} + \frac{1}{2} - \frac{4}{3}m_3h \right) \quad (3.38)$$

Погонний власний опір жили:

$$\underline{Z}_{жс} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_7 - 2\underline{Z}_4 \quad (3.39)$$

Погонний власний опір екрану:

$$\underline{Z}_e = \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_7 \quad (3.40)$$

Погонний взаємний опір між жилою і екраном одного і того ж кабелю

$$\underline{Z}_{жсe} = \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6 + \underline{Z}_7 - \underline{Z}_4 \quad (3.41)$$

Погонний взаємний опір жили (екрану) і сусіднього кабелю

$$\underline{Z}_K = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( -\ln \frac{1.781m_3s_{km}}{2} + \frac{1}{2} - \frac{2}{3}m_3(h_k + h_m) \right) \quad (3.42)$$

де  $s_{km}$  – відстань між центрами  $k$ -ї та  $m$ -ї фаз кабелю;  $h_k$  та  $h_m$  – глибина прокладки  $k$ -ї та  $m$ -ї фаз кабелю, що відраховується від поверхні землі.

Як видно, формули досить складні і без спеціальних комп'ютерних програм по їх розрахунку незручні у використанні. Для вирішення рівнянь системи (3.31) для знаходження напруг або струмів необхідно задати

додаткові рівняння і граничні умови. При заземленні з двох сторін і транспозиції екранів граничні умови записуються

(3.43)

$$\Delta U_{eA}=0, \Delta U_{eB}=0, \Delta U_{eC}=0$$

У разі транспозиції екранів необхідно врахувати граничні умови для струмів в вузлах транспозиції, для цього записуємо систему (3.31) для кожного циклу транспозиції (три рази). Струми і напруги в екранах в кінці ділянки прирівнюються до струмів і напруг на початку іншої ділянки відповідно .

Для запису граничних умов потрібно враховувати додаткові умови. Так як трифазна система падінь напруг, прикладених до жил, утворює систему прямої та зворотної послідовностей, то струми в жилах і екранах також утворюють систему прямої та зворотної послідовностей. Шукані опору прямої і зворотної послідовностей визначаємо шляхом ділення падіння напруги в фазі  $A$  на струм в цій фазі.

Додаткові умови для визначення опору:

прямої послідовності

$$I_{жA}+I_{жB}+I_{жC}=0$$

$$I_{eA}+I_{eB}+I_{eC}=0$$

нульової послідовності

$$I_{жA}=I_{жB}=I_{жC}$$

$$I_{eA}=I_{eB}=I_{eC}$$

Остаточні формули для розрахунку поздовжніх активно-індуктивних параметрів кабелю:

при заземленні екранів з двох сторін прямої послідовності



$$\underline{Z}_1 = (\underline{Z}_{\text{ж}} - \underline{Z}_K) - \frac{(\underline{Z}_{\text{жс}} - \underline{Z}_K)^2}{\underline{Z}_e - \underline{Z}_K} \quad (3.44)$$

при транспозиції екранів прямої послідовності

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{\text{ж}} - \underline{Z}_K \quad (3.45)$$

при заземленні з двох сторін і транспозиції екранів нульової послідовності

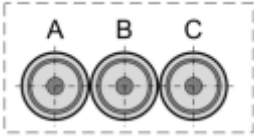
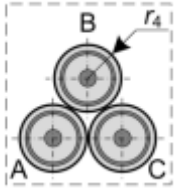
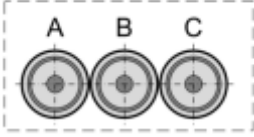
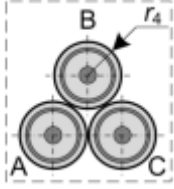
$$\underline{Z}_0 = (\underline{Z}_{\text{ж}} - 2\underline{Z}_K) - \frac{(\underline{Z}_{\text{жс}} + 2\underline{Z}_K)^2}{\underline{Z}_e + 2\underline{Z}_K} \quad (3.46)$$

Поздовжні активно-індуктивні параметри опорів кабельної лінії, враховуючи їх послідовності, залежать від способу заземлення і розташування фаз кабелю в просторі.

Наприклад, для кабелю номінальною напругою 330 кВ з мідною жилою  $F_{\text{ж}}=1000 \text{ мм}^2$  та мідним екраном  $F_{\text{э}}=500 \text{ мм}^2$ . Опір землі  $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , результати розрахунку представлені в таблиці 3.1.

Помітна відмінність активних і індуктивних опорів прямої та нульової послідовностей, це пояснюється різними заземленнями екранів, що призводить до наступних закономірностей: при струмі прямої послідовності взаємоіндукція з іншими фазами КЛ зменшує опір фаз; при струмі нульової послідовності взаємоіндукція з іншими фазами кабельної лінії збільшує опір фаз.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку активно-індуктивних параметрів трифазної групи однофазних кабелів

Способи з'єднання і заземлення екранів	Розташування фаз кабелю в просторі	Активно-індуктивні параметри прямої і нульової послідовностей			
		$R_1$	$X_1$	$R_0$	$X_0$
		Ом/км			
Екран заземлений з двох сторін		0.089	0.093	0.124	0.047
		0.039	0.086	0.124	0.047
Транспозиція екрану		0.021	0.191	0.124	0.048
		0.021	0.089	0.124	0.048

При розташуванні фаз трифазної КЛ трикутником взаємоіндукція між його фазами вище, ніж при розташуванні в площині. При заземленні екранів в двох точках і їх транспозиції в екранах створюються шлях для протікання струмів нульової послідовності, що призводить до зниження опору нульової послідовності лінії.

### **3.4.2 Урахування транспозиції струмопровідних екранів фазних кабелів при моделюванні довгих трифазних ліній електропередачі**

Аналіз існуючих моделей розкрив їхні переваги і недоліки і показав необхідність створення адекватної математичної моделі для розрахунку параметрів режиму кабельної лінії електропередачі в різних умовах роботи, характерних для даного об'єкта дослідження, що враховує сталі і перехідні режими роботи лінії.

Методи математичного моделювання складних систем досить добре описані [8, 103–105, 108]. Створення математичної моделі кабельної лінії електропередачі для конкретних умов роботи дозволяє виявити слабкі сторони системи, прогнозувати і виключити небажані або небезпечні режими роботи системи електропостачання. Також відпрацювання всіх можливих режимів роботи дає можливість виділити зони з оптимальними (раціональними) параметрами режиму. Тому наявність адекватної моделі дозволяє вирішувати важливі практичні завдання, пов'язані з аналізом і інтерпретацією кількісних характеристик, отриманих в результаті моделювання.

Математична модель реальної кабельної ЛЕП є абстрактним формально описаним об'єктом, вивчення якого можливо математичними методами. При розробці моделі проводиться таке спрощення реальної лінії, при якому несуттєві особливості системи відкидаються і вихідна задача зводиться до спрощеної системи, що піддається математичному аналізу.

Перевагою математичних моделей є те, що вони дозволяють перевіряти ефективність прийнятих рішень, не вдаючись до практичної реалізації. Для виконання рекомендуються тільки ті рішення, що відповідають поставленій меті, та виключається реалізація невдалих варіантів.

Головним недоліком, що виникають при застосуванні математичних моделей, є неповна адекватність моделі і лінії яка моделюється. Складність і різноманіття процесів функціонування складних систем електропостачання не дозволяють будувати для них абсолютно адекватні моделі. Математична модель, що описує режими роботи кабельної ЛЕП, враховує тільки характерні закономірності, залишаючи осторонь другорядні фактори. Основне призначення моделі – виконати прогнозну оцінку, абсолютно точне прогнозування неможливо. Більш того, часто буває важко отримати точний опис початкової інформації для моделювання.

На стадії проектування і експлуатації виникають питання обмеження поздовжніх струмів і напруг в екранах КЛ. Якщо не обмежувати струм, індуковані в екранах з двостороннім заземленням екранів лінії, то це призводить до появи перенапруг, які можуть перевищувати електричну міцність ізоляції, що призводить до старіння і руйнування ізоляції кабелю. Тому, необхідно уточнення математичних моделей для визначення струмів і напруг, які індукуються в екранах кабелів.

Для зниження струмів в екранах кабелю в нормальних і аварійних режимах, а так само зменшення електричних втрат в надвисоковольтних КЛ 150-500 кВ використовують транспозицію екранів.

Падіння напруги на екранах трифазної кабельної ЛЕП визначаються трьома рівняннями з основної системи (3.3):

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{eA} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсA}} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{\text{жсB}} + \dot{I}_{eB} + \dot{I}_{\text{жсC}} + \dot{I}_{eC}) \\ \Delta \dot{U}_{eB} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eB} + \underline{Z}_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсB}} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{\text{жсA}} + \dot{I}_{eA} + \dot{I}_{\text{жсC}} + \dot{I}_{eC}) \\ \Delta \dot{U}_{eC} &= \underline{Z}_e \dot{I}_{eC} + \underline{Z}_{\text{жсe}} \dot{I}_{\text{жсC}} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{\text{жсA}} + \dot{I}_{eA} + \dot{I}_{\text{жсB}} + \dot{I}_{eB})\end{aligned}\quad (3.47)$$

Математична модель струмів і напруг в екранах трифазних КЛ однофазного виконання при транспозиції екранів запишемо, з урахуванням граничних умов (3.43). Рівняння для трьох ділянок кабелю рівної довжини між вузлами транспозиції записуємо з урахуванням того, що кожен екран проходить уздовж кожної фази.

На першій ділянці екран фази  $A$  з кожної ділянки транспозиції:

$$\Delta \dot{U}_{eA1} = \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_e \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{жe} \dot{I}_{жA} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eB} + \dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \right] \quad (3.48)$$

На другій ділянці – вздовж фази  $B$ :

$$\Delta \dot{U}_{eA2} = \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_e \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{жe} \dot{I}_{жB} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eB} + \dot{I}_{жC} + \dot{I}_{eC}) \right] \quad (3.49)$$

На третій ділянці - вздовж фази  $C$ :

$$\Delta \dot{U}_{eA3} = \frac{1}{3} \left[ \underline{Z}_e \dot{I}_{eA} + \underline{Z}_{жe} \dot{I}_{жC} + \underline{Z}_K (\dot{I}_{жA} + \dot{I}_{eB} + \dot{I}_{жB} + \dot{I}_{eC}) \right] \quad (3.50)$$

У лівій частині рівнянь (3.48 – 3.50) падіння напруги на екрані фази  $A$  вздовж всієї довжини лінії для циклу транспозиції

$$\Delta \dot{U}_{eA1} + \Delta \dot{U}_{eA2} + \Delta \dot{U}_{eA3} = \Delta \dot{U}_{eA} = 0$$

При ідеальній транспозиції екранів, в нормальному режимі роботи, в екрані кабелю струми відсутні. З рівнянь (4.3.2.2 - 4.3.2.4) визначимо напругу  $\Delta U_{\Sigma A1}$ , що є падінням напруги на першій ділянці екрана фази  $A$  і напругою екрану щодо землі в вузлі транспозиції, в кінці першої ділянки

$$\Delta \dot{U}_{eA1} = \frac{1}{3} (\underline{Z}_{жe} - \underline{Z}_K) \dot{I}_{жA}$$

$$\Delta \dot{U}_{eA2} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{\text{же}} - \underline{Z}_K) \dot{I}_{\text{ж}B}$$

$$\Delta \dot{U}_{eA3} = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{\text{же}} - \underline{Z}_K) \dot{I}_{\text{ж}C}$$

Модуль падіння напруги в вузлах транспозиції визначається виразом:

$$|\Delta \dot{U}_{TP}| = |\underline{Z}_{\text{же}} - \underline{Z}_K| \frac{\dot{I}_{\text{ж}A}}{3} \quad (3.51)$$

В умовах експлуатації не можливо домогтися ідеальної транспозиції, тому струми в екранах будуть присутні при будь-якому проектному рішенні. Виходячи з симетрії задачі, струм, що протікає по контуру земля – фаза  $A$  на початку і в кінці кабелю представляється як ємнісний струм першої і відповідно другої половини довжини кабельної лінії

$$\dot{I}_{\text{ж}A}^H = j\omega \left( \frac{C_{\text{же}}}{3} \right) \dot{U}_{\text{ж}A} + j\omega \left( \frac{0.5C_{\text{же}}}{3} \right) \dot{U}_{\text{ж}B}$$

Для напруг фази  $A$  напруг щодо землі, в симетричному режимі

$$\dot{U}_{\text{ж}B} = U_{\text{ж}A} e^{j120^\circ} = \frac{1}{2} U_{\text{ж}A} (-1 - j\sqrt{3})$$

$$\dot{U}_{\text{ж}C} = U_{\text{ж}A} e^{-j120^\circ} = \frac{1}{2} U_{\text{ж}A} (1 - j\sqrt{3})$$

Звідки величина струму в екрані

$$\dot{I}_{eA}^H = j\omega \cdot l \cdot \frac{\dot{U}_{\text{ж}A}}{3} + j\omega \cdot l \cdot \frac{C_{\text{же}}}{6} \cdot \frac{1}{2} \dot{U}_{\text{ж}A}$$

або

$$\dot{I}_{eA}^H = j\omega \cdot l \cdot C_{\text{же}} \cdot \dot{U}_{\text{ж}A} \cdot \frac{(3 - j\sqrt{3})}{12}$$

Отже, величина модуля струму в екрані

$$\dot{I}_{eA}^H = \dot{I}_{eA}^K = \frac{1}{2} \omega \cdot l \cdot C_{\text{же}} \cdot \frac{\dot{U}_{\text{ж}A}}{\sqrt{3}}$$

У разі, коли застосований не один повний цикл транспозиції  $N > 1$ , струм в екрані кабелю знижується пропорційно  $N$ .

Перевагами системи з транспозицією екранів є відсутність струмів і додаткових втрат потужності в екрані, відсутність додаткового джерела нагрівання кабелю при заземленні екранів з обох кінців кабельної лінії.

### **3.4.3 Використання багатополісників та їх схем заміщення в програмі Matlab/Simulink для розрахунку перехідних процесів у довгих трифазних кабельних лініях**

Для імітації та аналізу перехідних електромагнітних процесів у високовольтних кабельних лініях електропередачі, в роботі розроблено імітаційну модель лінії, яка реалізована за допомогою ланцюгової схемою заміщення на базі інтерактивного інструменту для моделювання Simulink. Це дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати і аналізувати електромагнітні процеси як при нормальному режимі так і при аварійному режимі роботи КЛ. Залежно від необхідного результату і точності рішення для моделювання може бути обраний раціональний метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни часу моделювання (з фіксованим або змінним кроком). В ході моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в електричному колі. Результати моделювання представлені у вигляді графіків і таблиць.

На практиці широко застосовуються методи розрахунку перехідних процесів в КЛ електропередачі, які не дозволяють з достатньою точністю отримати форми кривих струму і напруги перехідних процесів при нелінійності навантажень і складних видів пошкоджень [122–124]. Як правило, при розрахунках перехідних процесів ведеться або якісний, або

кількісний аналіз параметрів процесу, таких, як діючі значення струмів і напруг, симетричних складових, гармонійного складу сигналів струму і напруги, і не розглядається картина перехідного процесу в цілому з урахуванням взаємного впливу елементів комплексної навантаження [125, 126].

Існують два основні підходи до моделювання перехідних процесів в КЛ, засновані на схемах заміщення лінії електричного кола з зосередженими параметрами і на представленні лінії у вигляді кола з розподіленими параметрами [105, 111].

При дослідженні низькочастотних перехідних процесів в КЛ або в разі коротких ліній, аналіз перехідних процесів, як правило, виконується на основі П або Т-подібної схеми заміщення із зосередженими параметрами [108, 118, 120]. Поздовжні і поперечні параметри  $R$ ,  $L$ ,  $C$  схеми заміщення лінії є функціями, які залежать від частоти. При цьому, якщо для досліджуваного перехідного процесу можна виділити одну характерну частоту, то в розрахунках використовують параметри на цій частоті. Якщо ж перехідний процес характеризується широким спектром частот, то для кожного з параметрів синтезується додаткова схема заміщення з зосередженими параметрами, реалізує його частотну характеристику. Відносно в КЛ такий підхід розглянутий у [8, 108, 53, 55, 58]. Для розрахунку перехідних процесів у відносно довгою лінії можливе використання розрахункового прийому поділу цієї лінії на короткі ділянки такої довжини, яка дозволяє використовувати для кожної ділянки схему заміщення з зосередженими параметрами, при цьому КЛ розглядається як ланцюгова схема заміщення.



Принципова схема заміщення ділянки трифазної кабельної лінії представлена на рис. 3.14, розглядається як багатополюсна схема заміщення однорідної ділянки лінії.

На рис. 3.14 прийняті такі позначення:  $R_1..R_6$ ,  $L_1..L_6$  – опори та індуктивності ділянок КЛ на одиницю довжини;  $C_{11}..C_{62}$ ,  $G_{11}..G_{62}$  – провідності і ємності між проводами фаз і між проводами і землею;  $M_{12}$ ,  $M_{34}$ ,  $M_{56}$  – взаємна індуктивність між жилою і екраном одного і того ж кабелю;  $M_{AB}$ ,  $M_{AC}$ ,  $M_{CA}$  – взаємна індуктивність між жилою (екраном) і сусіднім кабелем;  $M_{Ak}$ ,  $M_{Bk}$ ,  $M_{Ck}$ ,  $M_{1k}$ ,  $M_{2k}$ ,  $M_{3k}$  – взаємні індукції між фазами А,В,С та екранами 1,2,3 та іншими  $k$ -ми проводами.

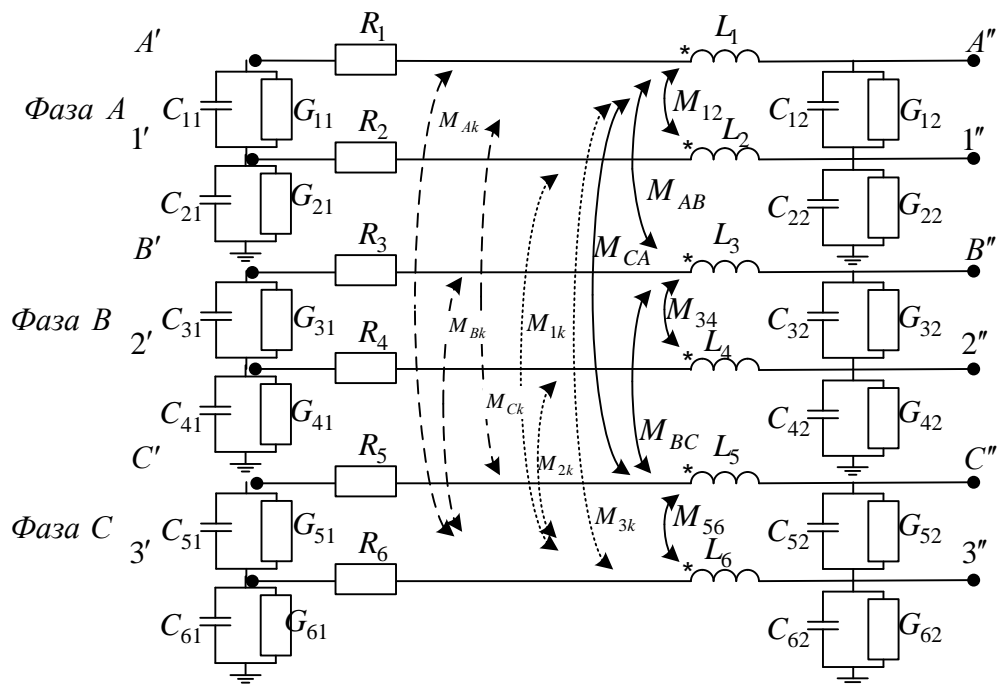


Рисунок 3.14 – Принципова схема заміщення ділянки трифазної КЛ у вигляді еквівалентного багатополюсника

На підставі вищевикладеного в середовищі Matlab-Simulink з використанням пакета розширення SimPowerSystems розроблена комплексна модель дослідження роботи високовольтної трифазної кабельної лінії

електропередачі (рис. 3.15). З точки зору аналізу лінія являє собою шестипровідну систему (три жили і три екрана) з додатковим сьомим проводом – землею.

Розроблена модель реалізує принципи чисельного моделювання лінійних систем з автоматичним складанням і вирішенням складних алгебраїчних і диференціальних рівнянь, які використовуються у теорії електричних кіл. Для вирішення рівнянь моделі обраний однокроковий явний метод Рунге-Кутта 4-го і 5-го порядку зі змінним кроком *ode45* (Dormand-Prince). Даний метод дає хороші результати при нормальній швидкості рішення. Відносна похибка інтегрування задана величиною  $10^{-3}$ .

Електрична схема заміщення ділянки довжиною  $L_{\text{meters}}$ , реалізується у вигляді еквівалентного багатополюсника (рис. 3.15) з урахуванням взаємоіндуктивних зв'язків існуючих між індуктивностями жил та екранів.

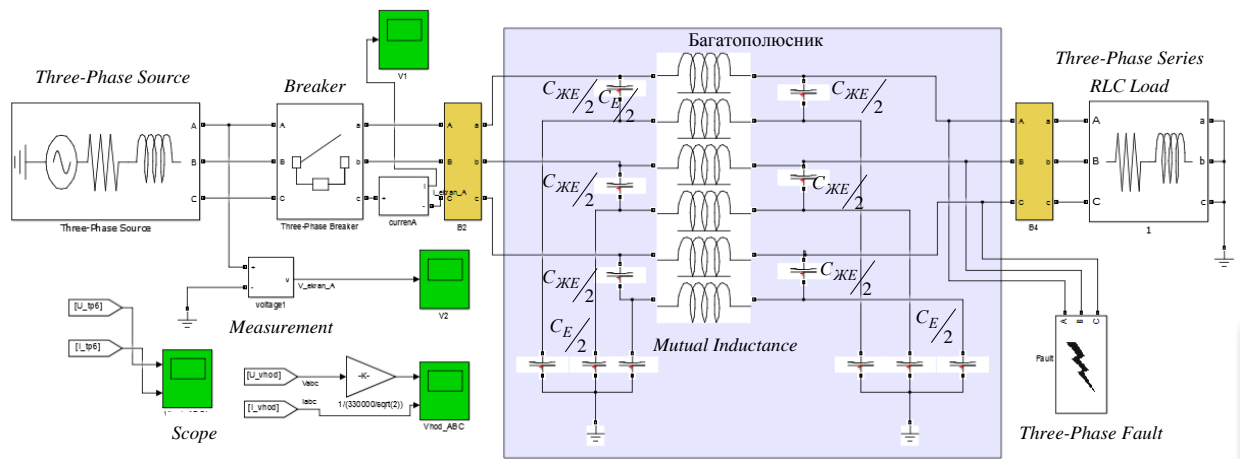


Рисунок 3.15 – Структурна схема моделі для дослідження електромагнітних процесів у високовольтній КЛ

Схема моделі включає в себе:

- трифазне джерело живлення (*Three-Phase Source*), з діючим значенням лінійної напруги 330 кВ і частотою  $f = 50$  Гц, еквівалентними

внутрішніми параметрами джерела і лінії електропередачі на ділянці від джерела до КЛ;

- багатополіусник (*Mutual Inductance*), в якому враховується взаємно індуктивний зв'язок, який задається матрицею (3.52) власних і взаємних опорів на одиницю довжини, що складається з опорів, які знаходяться з використанням формул (3.39 - 3.42):

$$M_{MI} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{ЖА} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{13} & \dot{Z}_{14} & \dot{Z}_{15} & \dot{Z}_{16} \\ \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕА} & \dot{Z}_{23} & \dot{Z}_{24} & \dot{Z}_{25} & \dot{Z}_{26} \\ \dot{Z}_{31} & \dot{Z}_{32} & \dot{Z}_{ЖВ} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{35} & \dot{Z}_{36} \\ \dot{Z}_{41} & \dot{Z}_{42} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕВ} & \dot{Z}_{45} & \dot{Z}_{46} \\ \dot{Z}_{51} & \dot{Z}_{52} & \dot{Z}_{53} & \dot{Z}_{54} & \dot{Z}_{ЖС} & \dot{Z}_{ЖЕ} \\ \dot{Z}_{61} & \dot{Z}_{62} & \dot{Z}_{63} & \dot{Z}_{64} & \dot{Z}_{ЖЕ} & \dot{Z}_{ЕС} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

- ємності між проводами фаз фаз  $C_{ЖЕ}$  і між проводами і землею  $C_E$  (*Series RLC Load*), параметри яких визначаються формулами, на одиницю довжини:

$$C_{ЖЕ} = \frac{17.7 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad C_E = \frac{17.7 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{r_4}{r_3}}$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність ізоляції.

- блок активного трифазного навантаження (*Three-Phase Series RLC Load*), параметри якого вибираються з урахуванням заданого номінального струму що протікає в жилі;

- дослідження несиметричних і аварійних режимів роботи електричного кола, що виникають в результаті коротких замикань, обривів ліній, а також зміни навантаження, можливо при використанні в моделі

блоків, які моделюють комутаційні апарати (*Breaker*) і блок моделювання КЗ на землю (*Three-Phase Fault*).

- засоби візуалізації струмів і напруг у вигляді осцилограм, представлені за допомогою осцилографів (*Scope*) і трифазних вимірюючих приладів (*Three-Phase V-I Measurement*).

Кожен з перерахованих блоків має своє налаштування, які визначають особливості досліджуваної електричної системи.

Дана модель дає можливість розглядати значення напруг і струмів на початку або в кінці лінії. У разі, коли потрібен аналіз розподілу напруги і струму в уздовж лінії, то доцільно лінію розглядати як однорідну ланцюгову схему заміщення з необхідною кількістю елементарних ланок, які складаються з еквівалентних багатополіусників і можуть мати різні з'єднання жил і екранів (рис.3.16).

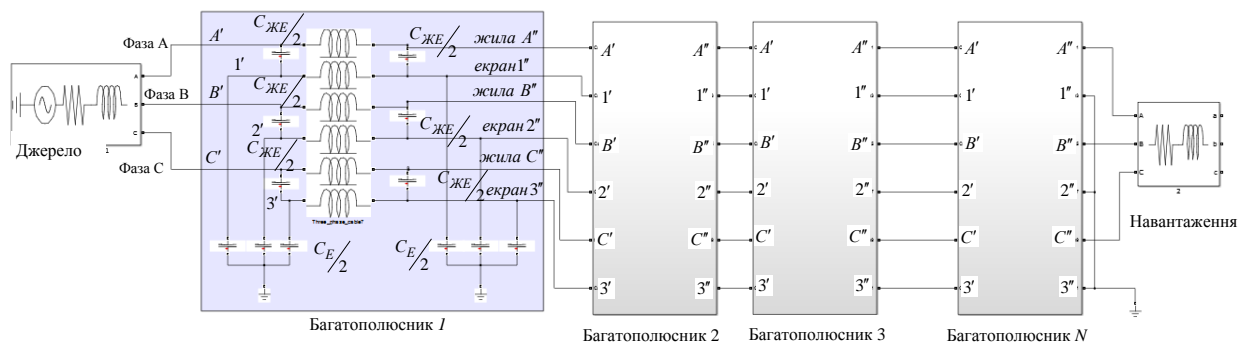


Рисунок 3.16 – Ланцюгова схема заміщення

Описана модель є спрощеною, оскільки в ній не враховуються динамічні характеристики джерел енергії і навантаження. Разом з тим, завдяки зручному для користувача інтерфейсу програмного комплексу Matlab / Simulink, відкрита структура моделі дозволяє оперативно змінювати її топологію і параметри блоків в залежності від конкретного завдання. Зокрема, топологію побудованої моделі можна буде використовувати в

подальшому для дослідження двофазних, трифазних і інших складних замикань в кабельній ЛЕП. Дана модель також дозволяє проводити комплексне дослідження показань віртуальних приладів при включенні в модель паралельних вузлів і навантажень з динамічно змінними параметрами, що дає можливість проводити розрахунки різних режимів роботи енергосистеми описаного типу на початкових стадіях проектування.

Досліджувана високовольтна лінія електропередачі має живлення від ПС-330 кВ, протяжність лінії складаємо 3000 м. Параметри схеми заміщення лінії, розраховуються з урахуванням геометричних даних однофазного кабелю по методиці наведеної в параграфі 3.4.1.

Тут розрахункове електричне коло КЛ представлене у вигляді необхідної кількості ділянок кабелів з СПЕ ізоляцією, довжиною  $l=1000$  м кожен, з геометричними параметрами  $r_1=17.4$  мм,  $r_2=42.8$  мм,  $r_3=46.5$  мм,  $r_4=52.5$  мм.

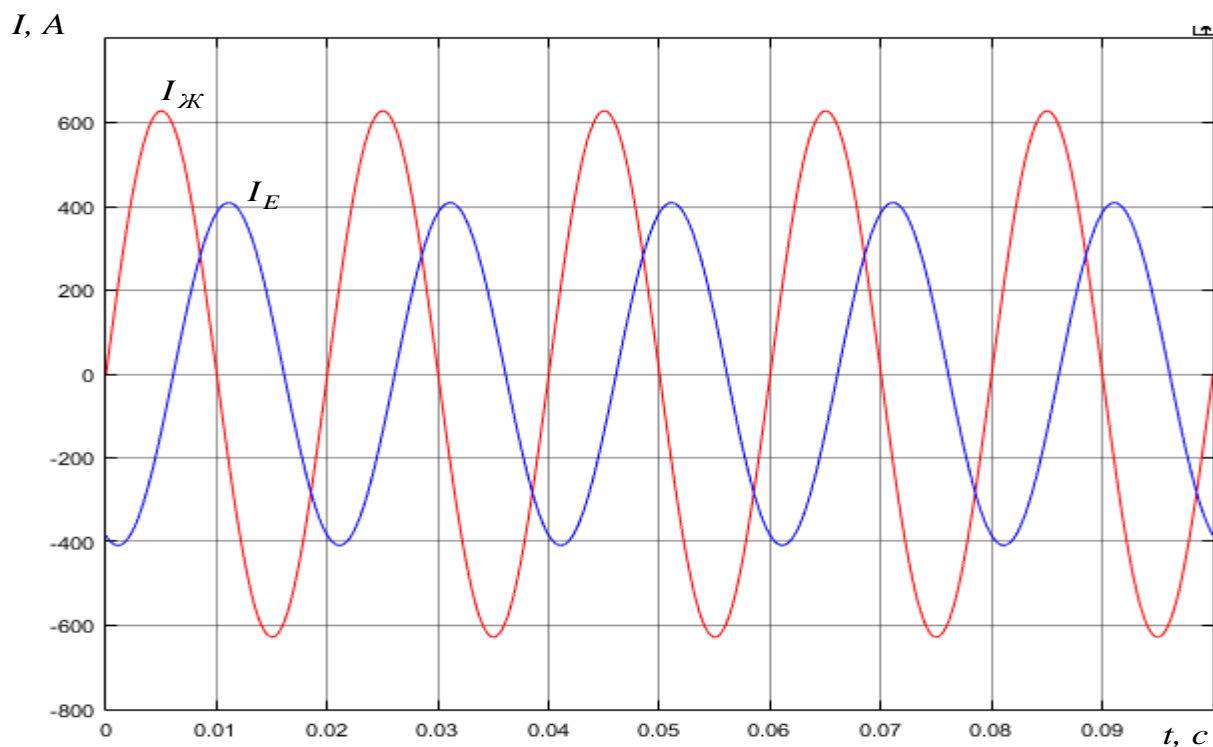


Рисунок 3.17 – Осцилограма струму в жилі та екрані (фаза А) при заземленні екранів кабелю з двох сторін

На практиці високовольні КЛ можуть виконуватися з різних з'єднанням екранів: для коротких ліній можливо заземлення екранів на обох кінцях кабелів. В цьому випадку в екранах протікають значні за величиною індуковані струми, що викликають додатковий нагрів екрану і втрати потужності. У лініях великої довжини струми в екранах можна порівняти з струмами в жилі – 400 А в екрані, проти 630 А струму в жилі (рис. 3.17).

У випадках довгих ліній широко використовуються схема з транспозицією екранів. При ідеальній транспозиції (рис. 3.5) коли всі три ділянки однакової довжини  $l_1=l_2=l_3$ , струми в екранах в нормальному режимі відсутні (рис. 3.18).

Як правило, під транспозицією екранів розуміють ідеалізований випадок, коли дві транспозиційні муфти поділяють кабель довжиною  $L_K$  на три ділянки рівної довжини  $L_1=L_2=L_3=L_K/3$ . Однак на практиці нерідко виникають певні обмеження на вибір місць установки муфт і коробок транспозиції – в таких випадках застосовується неідеальної транспозиція  $L_1 \neq L_2 \neq L_3$ . Отже, при будь-яких співвідношеннях довжин ділянок кабелю між вузлами транспозиції  $L_1 \neq L_2 \neq L_3$  така «неправильна» транспозиція не вносить спотворень в режим роботи мережі (ніяк не впливає на струми жил кабелю) [103, 106, 127–132].

Рішення такого завдання є досить складним, так як при прокладанні кабелю необхідно враховувати довжину кабелю на барабані, перетин його струмопровідної жили і екрану, кількість допустимих місць з'єднань і обмеження для транспозиція екранів, що виникають із-за особливостей інженерних споруд, річок, доріг та інші перешкоди на трасі [71].

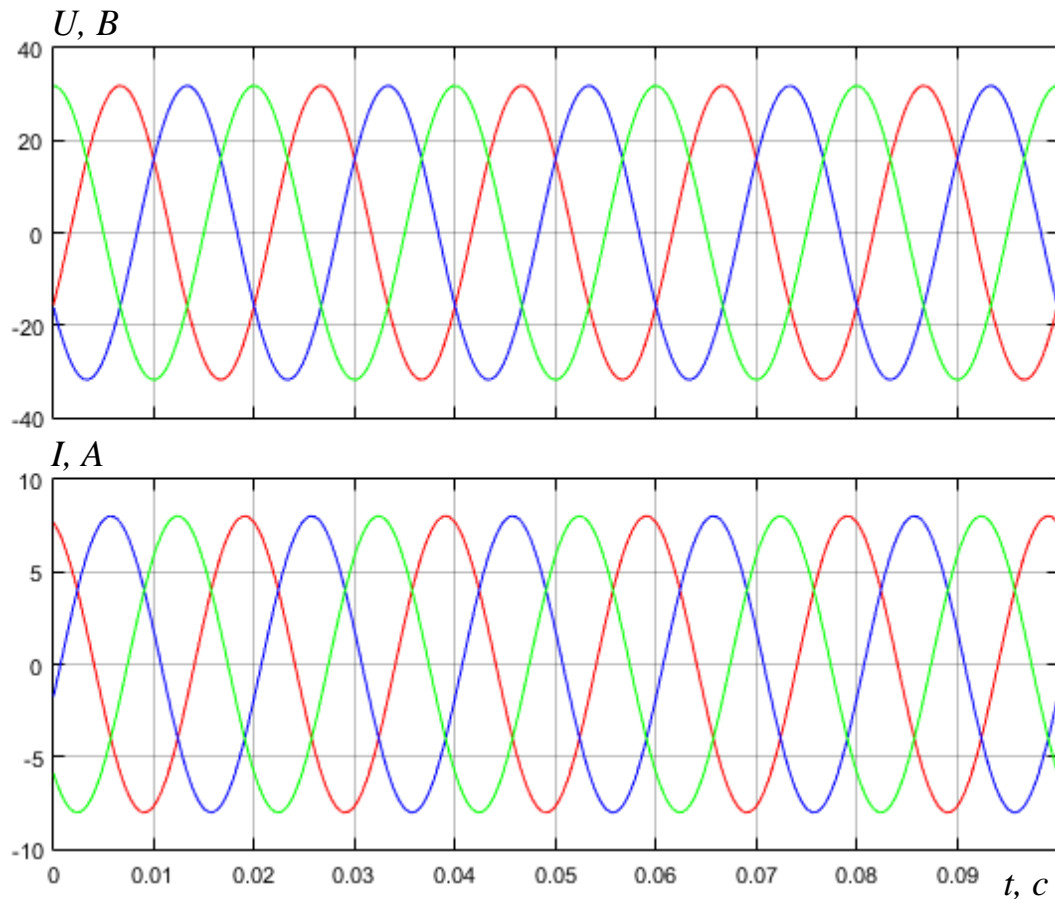


Рисунок 3.18 – Осцилограми напруги і струму в екрані при ідеальній транспозиції екранів кабелю ( $L_1=L_2=L_3=L_K/3$ )

На рис. 3.19 показана осцилограма струму в екрані при несиметричній транспозиції екранів ( $L_1=L_2+L_3$ ). Як видно, що при різних довжинах ділянок кабельної лінії в екрані з'являється струм 120 А, що в свою чергу призводить до появи додаткових втрат в лінії. Для порівняння, в лінії без транспозиції, струм в екрані становив 400 А (рис. 3.17), що практично в 3.3 рази більше ніж при використанні неповного циклу транспозиції, що призводить до додаткових втрат потужності.

З наведеного вище аналізу видно, що при реалізації повного циклу транспозиції (рис. 3.18) відчутне (в десятки разів) зниження втрат потужності в екранах в порівнянні з лінією без транспозиції (рис. 3.17). Так само, у разі

використанням неповного циклу ( $L_1=L_2+L_3$ ) (рис.3.19), яке дозволило знизити струм в екрані майже в два рази.

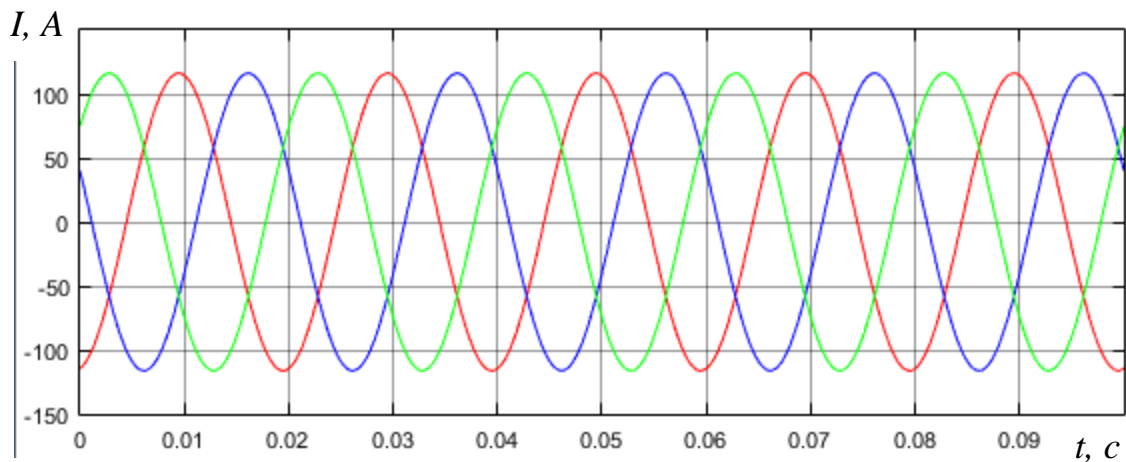


Рисунок 3.19 – Осцилограма струму в екрані при несиметричній транспозиції екранів ( $L_1=L_2+L_3$ )

Модель дозволяє моделювати і аналізувати перехідні електромагнітні процеси, які відбуваються в високовольтній кабельній лінії електропередачі для аналізу, дослідження і вивчення перехідних явищ, при розробці, проектуванні та експлуатації в нормальних режимах і в аварійних ситуаціях. Так само, модель дозволяє врахувати несиметричне розташування фаз, уточнити вплив струмів, що протікають через елементи лінії при різних з'єднаннях ділянок кабельної лінії.

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Виконані дослідження показали, що при складанні фізичних моделей і при моделюванні за допомогою спеціальних комп'ютерних програм для розрахунку перехідних процесів доцільно використовувати ланцюгові схеми заміщення кола з розподіленими параметрами.

2. Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на



основі використання теорії багатополюсників і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні переріз екранів та кількість їх транспозицій.

3. На підставі теорії багатополюсників було удосконалено методику розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі з урахуванням наведеної ЕРС взаємодукції. Реалізована методика в програмному пакеті Matlab/Simulink, який забезпечує визначення особливостей протікання перехідних процесів у трифазних кабельних лініях з уточненням кількісних характеристик цих процесів.

4. Практичне застосування підходу передбачає подання багатополюсних елементів схемами заміщення, пов'язаних з обмеженням розміру схеми, числа незалежних елементів кола, а так само проблемами розробок схем заміщення в якості математичної моделі елемента системних параметрів багатополюсника. Зменшення розмірів системи дослідження зі збереженням багатополюсників електричного кола досягається використанням ланцюгових схем заміщення, що дозволяє аналізувати кола з багатополюсними елементами з метою створення єдиного підходу для аналізу і проектування електричних кіл у вигляді високовольтних кабельних ліній електропередачі для підвищення ефективності їх розрахунку із застосуванням програмних обчислювальних засобів.

5. В трифазних системах, що містять одножильні кабелі, поздовжні струми в екранах виникають при з'єднанні екранів між собою на кінцях лінії, що призводить до індукування струмів в екранах кабелю, що порівнюються з величиною струму в жилі.

6. Розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками шляхом представлення цих кіл багатополюсниками із

зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків.

7. Удосконалено модель високовольної кабельної лінії електропередачі, яка реалізована ланцюговою схемою заміщення складаються з еквівалентних двенадцятиполюсників з з'єднанням екранних полюсів по типу транспозиції в програмі Matlab/Simulink для аналізу і розрахунку перехідних процесів. Модель універсальна і може бути застосована до дослідження та аналізу сталих перехідних процесів, на підставі реалізації принципів чисельного моделювання лінійних систем з автоматичним складанням і вирішенням складних алгебраїчних і диференціальних рівнянь які застосовуються у теорії електричних кіл.

Модель має такі переваги:

- універсальна і підходить для розрахунку і аналізу різних електричних кіл до складу яких сходять високовольні кабельні ЛЕП;
- алгоритми дають можливість варіювати будь-які параметри схеми заміщення і керуючі впливи, що дозволяють будувати досить гнучкі моделі різних електричних кіл, які містять кабельні ЛЕП;
- дозволяє міняти параметри і конфігурацію схеми заміщення на часовому діапазоні моделювання, що розширює спектр розглянутих режимів;
- придатна до моделювання різних режимів навантаження, що дозволяє без труднощів враховувати різні види несиметрії трифазних кабельних ліній;
- дозволяє розглядати не тільки процеси, які відбуваються в окремій електротехнічній схемі, а й оцінювати вплив на все електричне коло та інші пристрої.

## **РОЗДІЛ 4**

### **АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЯК БАГАТОПОЛЮСНИКАХ, ЩО ВРАХОВУЮТЬ ЇХ ПАРАМЕТРИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЗВ'ЯЗКИ**

Одним із сучасних методів підвищення надійності та безпеки кабельних ліній електропередачі високої і надвисокої напруги є застосування в них кабелів зі зшитою поліетиленовою (СПЕ) ізоляцією, яка відрізняється підвищеними експлуатаційними характеристиками, особливо в місцевостях з щільною забудовою і розгалуженими комунікаціями. Повітряні і кабельні лінії мають суттєво різні зосереджені і розподілені реактивні параметри, сукупність яких в електричних колах високої і надвисокої напруги можуть викликати перехідні процеси і закономірності, які до сих пір не досліджувалися. Мало відомі також діапазони зміни розподілених параметрів сучасних високовольтних і надвисоковольтних кабелів зі СПЕ ізоляцією при їх експлуатації в різних режимах.

У нормальному режимі передачі потужності ці коливальні властивості не проявляються. Однією з причин виникнення в кабельних лініях короточасних перенапруг або надструмів при планових і випадкових комутаціях є накопичення електричної і магнітної енергій в реактивних елементах електричного кола. Кожна комутація викликає перехідний процес, який може привести до перекриття ізоляції [27, 112].

Багато видів комутаційних перенапруг підлягають обмеженню. Техніко-економічні обґрунтування заходів захисту від перенапруг включають в себе оцінку статистичних характеристик збитку внаслідок пошкодження, простого або позачергового ремонту електроустаткування кабельної лінії, а так само внаслідок порушення технологічного процесу у споживачів.

Сказане вище обумовлює актуальність моделювання та аналізу електромагнітних процесів, що виникають при підключенні і комутаціях кабельних ліній в надвисоковольтних трифазних електричних колах.

#### **4.1 Аналіз перехідних процесів у довгій трифазній кабельній лінії з урахуванням транспозиції струмопровідних екранів фазних кабелів і короткого замикання одного з них на землю**

Для дослідження електромагнітних перехідних процесів у високовольтній кабельній лінії електропередачі в параграфі 3.4 була створена модель з ланцюгової схемою заміщення, яка складаються з еквівалентних багатополюсників із з'єднанням екранних полюсів по типу транспозиції.

Розглянемо струми і напруги в жилах та екранах при замиканні фази  $A$  на землю. Це дозволяє аналізувати зміну перехідних складових струмів і напруг кожної фази трифазної кабельної лінії електропередачі і оцінити рівень перенапруги і амплітуду струмів короткого замикання в екранах з урахуванням транспозиції.

Розглянемо електричне коло (рис.3.15 параграф 3.4.3), що складається з джерела з діючим значенням лінійної напруги 330 кВ, навантаженням, обраним з урахуванням номінального струму (650 А) в жилі кабелю і ланцюгової схеми заміщення, яка моделює трифазну КЛ електропередачі. Розглядався випадок, коли через 0.02 с, після виходу системи в усталений режим, відбувається замикання фази  $A$  на землю, а через 0.03 с від початку короткого замикання лінії, лінія після нетривалого перехідного процесу повертається в попередній усталений режим.

Розглянемо перенапруги в фазах кабелю (рис. 4.1). Як видно, при замиканні фази  $A$  на землю, напруга  $U_A$  приймає значення рівні нулю. У

фазах  $B$  і  $C$  максимальне значення амплітуди не змінюється, але в перший момент комутації з'являється перехідний процес, обумовлений перезарядом ємностей в лінії.

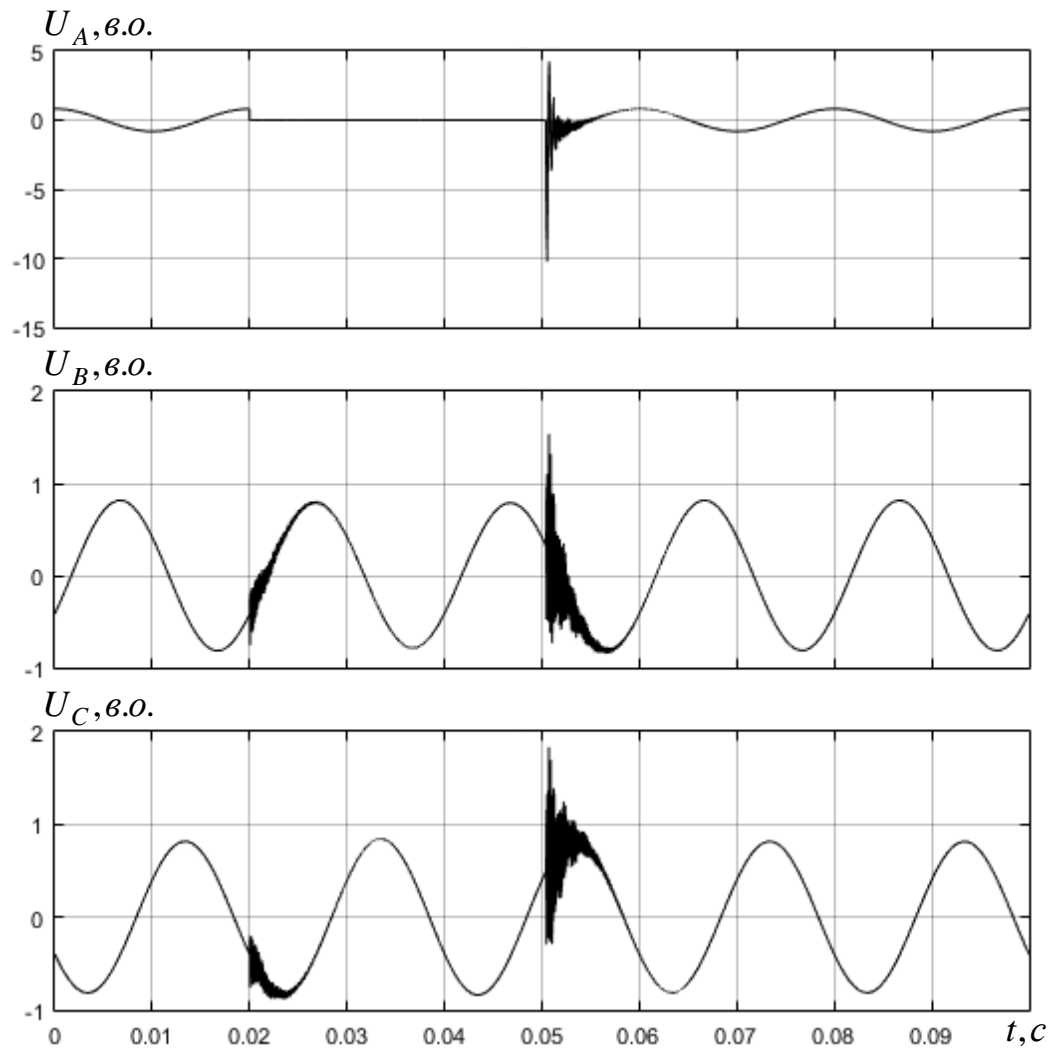


Рисунок 4.1 – Осцилограма напруг у фазах трифазної КЛ при замиканні фази  $A$  на землю

Після відключення комутації на землю фази  $A$ , перехідний процес характеризується появою високочастотних коливань викликаних наявністю в колі безлічі  $RLC$ -контурів, що виникають при послідовному з'єднанні еквівалентних багатополісників. Коливання напруги виникають під час

розряду ємностей поперечних віток схем заміщення ділянок КЛ. Крім того, можна побачити, що в фазі  $A$  амплітуда коливань напруги згасають швидше, в порівнянні з коливаннями в інших фазах, що обумовлено положенням вектора в фазі в момент комутації.

Із рис. 4.1 видно, що відновлення напруги  $U_A$  після відключення КЗ фази  $A$ , призводить до появи перенапруги, яке перевищує номінальне в 10 разів, у порівнянні з фазами  $B$  – 1.5 рази і  $C$  – майже 2 рази. При переході до робочого сталого режиму напруга фази  $A$  –  $U_A$  стрибком зростає від нульового значення до значення, амплітуда якого значно перевищує ЕРС джерела. Що є результатом перехідного коливального процесу, його вільні складові накладаються на амплітуду усталеного напруги.

Це пояснюється тим, що при КЗ в пошкодженій фазі  $A$  залишається заряд

$$Q = C \int_0^l u(l) \cos \beta(l-x) dx = \frac{C}{\beta} u(l) \sin \beta l$$

Цей заряд рівномірно розподіляється уздовж фази в результаті перехідного коливального процесу, після загасання якого на фазі встановлюється потенціал (напруга залишкового заряду)

$$U_0 = \frac{Q}{Cl} - u(l) \frac{\sin \beta l}{\beta l} = u(0) \frac{\operatorname{tg} \beta l}{\beta l} > u(0).$$

Перехідний процес є результатом ємнісного ефекту і тому напруга фази  $A$ , в перший момент часу після відключення КЗ може бути більше, ніж амплітуда ЕРС джерела. У нашому випадку напруга  $U_A$  після відключення КЗ миттєво змінює своє значення, яке рівне  $10U_\phi$ .

На рис. 4.2 показані часові залежності струмів в фазах трифазної кабельної лінії при замиканні фази  $A$  на землю. Струм  $I_A$  різко зростає, при цьому з'являється аперіодична складова. Різкий стрибок струму  $I_A$  обумовлений дією напруги джерела і зміною запасу енергії магнітного поля в індуктивності.

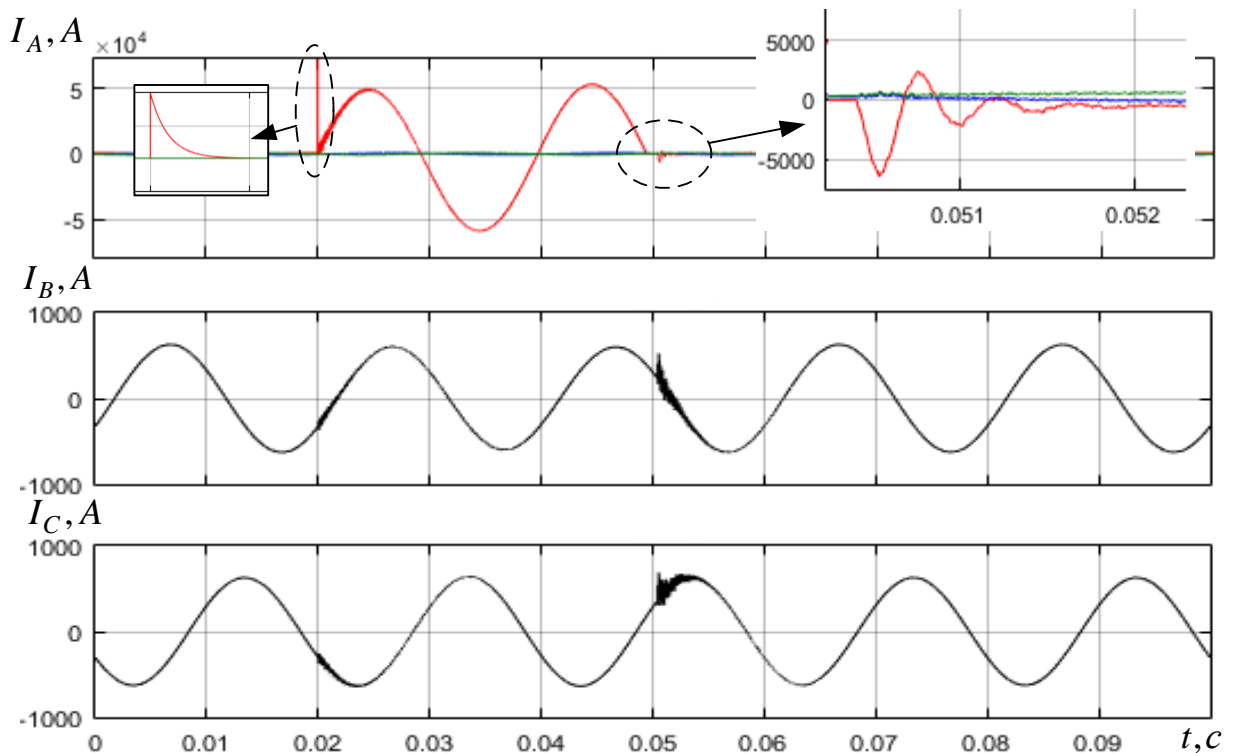


Рисунок 4.2 – Осцилограма струмів в фазах трифазної КЛ  
при замиканні фази  $A$  на землю

Коливання струмів непошкоджених фаз  $I_B$ ,  $I_C$  викликані наведенням з боку пошкодженої фази  $A$ , що пояснюється наявністю взаємної індуктивності між фазами кабельної лінії електропередачі.

Перехідні процеси в екранах однофазних кабелів і імпульси напруги є наслідком наведення індуктованих струмів з жилі кабелю. Осцилограми комутаційних перенапруг, як показано на рис. 4.3, мають складну форму коливань різних частот, які накладаються і викликають підвищення напруги.

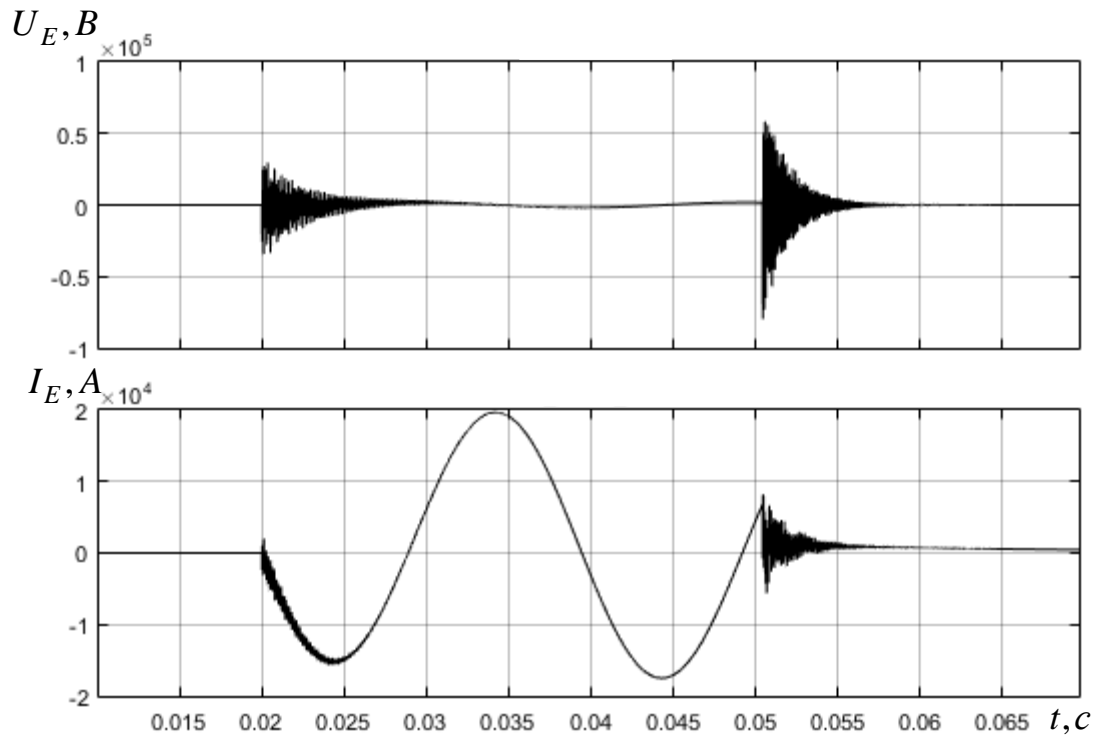


Рисунок 4.3 – Осцилограма напруги і струму в екрані трифазної КЛ при замиканні фази А на землю

Підвищення струму в екрані в момент комутації фази *A* на землю (рис. 4.3), обумовлено зміною запасу енергії магнітного поля індуктивності жили і дією взаємодукції між жилою і екраном. В наслідок збільшення взаємної індукції жили фази *A* на екрані, ЕРС взаємодукції збільшується, і в транспонованих екранах починають протікати індуковані струми порівнянні з струмами короткого замикання фази, що може призвести до перегріву струмоведучих частин та до термічного руйнування екрану.

Модель універсальна і може бути застосована для розрахунку і аналізу високовольтних кабельних ліній, при зміні будь-яких параметрів схеми заміщення і керуючих впливів, що дозволяє досліджувати різні електричні кола. Для розширення спектру розглянутих режимів, в моделі є можливість змінювати параметри і конфігурацію схеми заміщення на часовому діапазоні моделювання. Модель застосовна для аналізу різних режимів навантаження,



що дозволяє без труднощів враховувати різні види несиметрії трифазних кабельних ліній, досліджувати і аналізувати усталені перехідні електромагнітні процеси.

#### **4.2 Перехідні процеси і залежність напруги на екранах відключеної від навантаження трифазної кабельної лінії від її довжини**

При підключенні лінії без навантаження (режим холостого ходу) до джерела, спостерігається перехідний процес, який може призвести до значних перенапруг. Велика кратність перенапруг може бути знижена шляхом аналізу кривих перехідного процесу і вибору відповідних синхронізуючих пристроїв. При цьому усталена напруга в кінці розімкнутої лінії не повинна перевищувати допустиму  $U_{уст.} \approx (1,1 - 1,2)U_{ном.}$  У перехідному процесі максимальна величина перенапруги може досягати  $2 U_{уст.}$

Підвищення робочої напруги та збільшення довжини кабельних ліній електропередачі збільшує актуальність обмеження в них комутаційних процесів та перенапруг. При таких дослідженнях виникає необхідність уточнення умов для здійснення таких обмежень. Уточнення розрахунків перенапруг потребує обов'язкового та ретельного обліку основних природних факторів, таких як частотні залежності втрат у провідних середовищах КЛ. Все це визначає необхідність удосконалювати математичні моделі та алгоритми розрахунку перехідних процесів і використання для їх реалізації обчислювальної техніки [133–139].

Кабельні лінії високої та надвисокої напруг мають коливальний характер, оскільки містять зосереджені та розподілені індуктивності та ємності. В нормальних режимах передачі потужності ці коливальні властивості не проявляються. Однією з причин виникнення коливань

електричної та магнітної енергії є планові та аварійні комутації. Кожна комутація викликає перехідний процес, який може супроводжуватися перенапругами.

Деякі комутаційні перенапруги можливо обмежувати. Техніко-економічні обґрунтування заходів захисту від аварійних перенапруг включають у себе розрахунок та аналіз комутаційних перехідних процесів для оцінки статистичного збитку внаслідок негативного впливу цих процесів на роботу КЛ електропередачі [1-3, 6].

При підключенні КЛ до шин станції або підстанції виникає перехідний процес, який можна розглядати як розімкнену лінію довжиною  $l$ , при підключенні до джерела синусоїдальної напруги з внутрішньою індуктивністю  $L_{дж}$ . Максимальна напруга наводиться у кінці лінії. Знаючи криву перехідної напруги  $u(l, t)$ , використовуючи операторну форму запису перехідного процесу, можемо записати:

$$u(l, p) = \frac{E(p)}{\operatorname{ch} p\tau + pT \operatorname{sh} p\tau}$$

де  $T = L_{дж}/Z_C$ ;  $\tau = l/c = \sqrt{L'C'}l$ ;  $Z_C = \sqrt{L'/C'}$  – хвильові опори лінії;  $E(p)$  – зображення ЕРС джерела;

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \varphi) = E_m (\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t) \cdot \\ &\cdot E_m \left( \cos \varphi \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} + \sin \varphi \frac{p}{p^2 + \omega^2} \right) \end{aligned}$$

При включенні у максимум ЕРС ( $\varphi = 90^\circ$ )

$$u(l, t) = \frac{E_m}{p} \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{\operatorname{ch} p\tau + pT \operatorname{sh} p\tau} = \frac{E_m}{p} \frac{H(p)}{F(p)}$$

Використовуючи теорему розкладання, знаходимо оригінал:

$$u(l, t) = A_{\text{вум}} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \cos \omega_k t$$

де  $\omega_k$  – кутова частота власних коливань;  $A_{\text{вум}}$  – амплітуда вимушеної складової, яку визначаємо по формулі

$$A_{\text{вум}} = \frac{E_m}{\cos \omega \tau - \omega T \sin \omega \tau}$$

де  $A_k$  – амплітуда вільних складових, яку знаходимо із виразу:

$$A_k = E_m \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \frac{2}{\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau}}$$

де  $\delta_k$  – коефіцієнт затухання  $k$ -ої гармоніки.

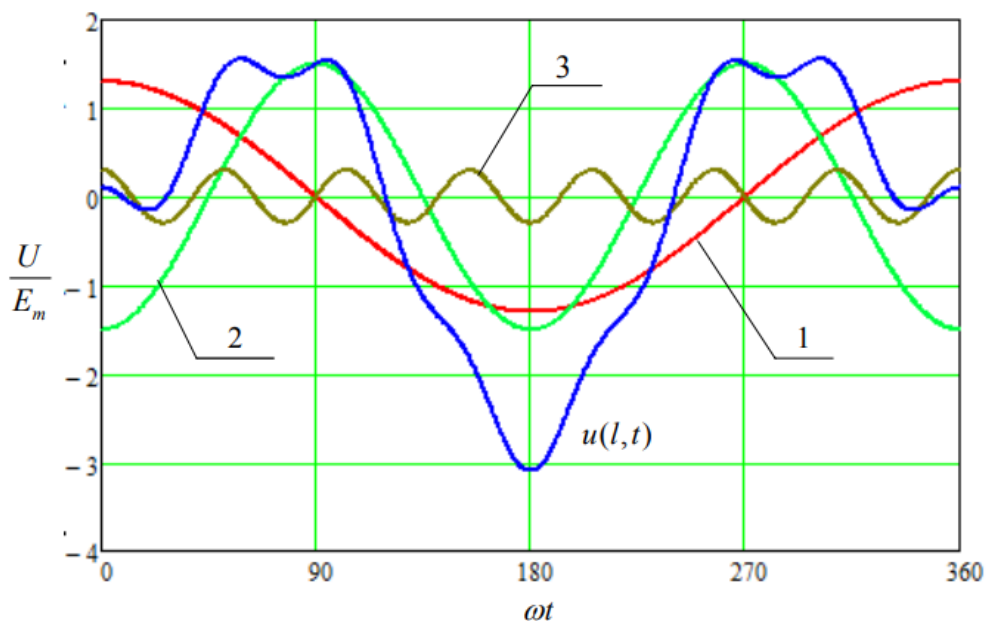


Рисунок 4.4 – Крива напруги перехідного процесу у кінці лінії та її складові:

1 – вимушена складова; 2 – перша гармоніка; 3 – друга гармоніка

Амплітуди вільних коливань утворюють знакозмінний ряд, члени якого зменшуються зі збільшенням порядкового номеру  $k$ . При  $t = 0$ :

$$A_{\text{вум}} - A_1 + A_2 - A_3 + \dots = 0$$

Звідси випливає, що  $A_1 > A_{вум}$ , це означає, що амплітуда першої вільної складової більше амплітуди вимушеної складової, а у випадку одно частотного коливального контуру  $A_1 = A_{вум}$ .

На рис. 4.4 показана крива напруги перехідного процесу у кінці лінії та її складові. Максимальне значення вимушеної та перших двох вільних складових можуть співпадати, що і спостерігається в нашому випадку у момент часу  $t = \pi/\omega$ :

$$U_{\max} \approx A_{вум} + A_1 + A_2,$$

за умови, що

$$\frac{U_{\max}}{A_{вум}} \approx \frac{A_{вум} + A_1 + A_2}{A_{вум}} = 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{вум}} > 2$$

Характер перехідного процесу можна показати, як Т-образну схему заміщення КЛ з внутрішніми параметрами індуктивних  $L'l$  та ємнісних  $C'l$  елементів на одиницю довжини лінії  $l$ , яка під'єднана до джерела синусоїдальної напруги з внутрішньою індуктивністю  $L_{дж}$  (рис. 4.5).

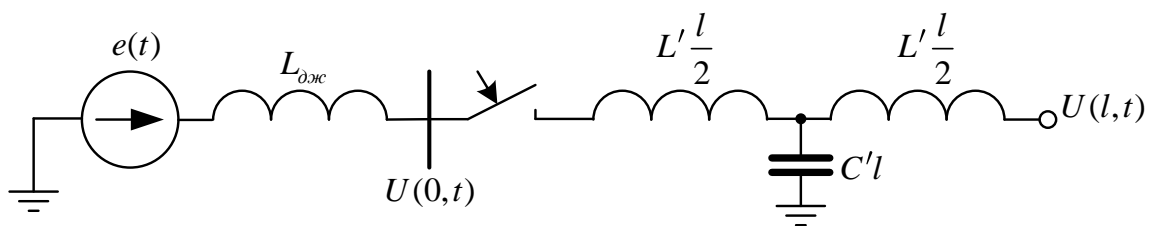


Рисунок 4.5 – Представлення лінії Т-образною схемою заміщення

Схему заміщення (рис. 4.5) з урахуванням еквівалентних перетворень послідовного з'єднання індуктивностей  $L_e = L_{дж} + L'l/2$  та ємності  $C_e = C'l$  можна представити простим коливальним контуром (рис. 4.6).

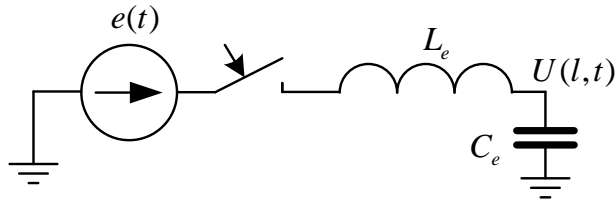


Рисунок 4.6 – Спрощена схема заміщення КЛ

Напруга в кінці лінії співпадає з напругою на ємності і містить складову вимушеної складової та першу вільну складову:

$$u(l, t) = u_{вим} + u_{вил} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \times \left[ \sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left( \frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right] \quad (4.1)$$

де  $\varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\omega} \operatorname{tg} \varphi\right)$ ;  $\omega$  – частота джерела;  $\omega_1 = 1 / \sqrt{L_e C_e}$  – частота вільних коливань;  $\delta = R / 2L_e$  – коефіцієнт затухання.

Із (4.1) слідує, що максимальна напруга у кінці лінії  $U_{max}$  визначається в основному кутом включення  $\varphi$  та частотою власних коливань  $\omega_1$ . Ці параметри визначають амплітуду вільних коливань

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left( \frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} \quad (4.2)$$

Для реальних КЛ електропередачі відношення першої власної частоти до промислової більше одиниці  $\omega_1 / \omega > 1$  [134, 137–139].

Аналізуючи формулу (4.2) можемо зробити висновок, що при  $\omega_1 / \omega > 1$  амплітуда вільної складової має найбільше значення при кутах вмикання, близьких до  $90^\circ$  або  $270^\circ$ . Якщо ж  $\omega_1 / \omega < 1$ , то амплітуда вільної складової

буде найбільшою, коли кут вмикання  $\varphi$  близький до  $0^\circ$  або  $180^\circ$ , такий випадок виникає тільки в лініях надвисокої напруги, коли для збільшення пропускної здібності використовують послідовне включення ємності для компенсації індуктивного опору лінії.

Розглянемо криві перехідного процесу у деяких окремих випадках. В якості прикладу проаналізуємо підключення до джерела КЛ при умові  $\omega_1 / \omega = 5$  та куті вмикання  $\varphi = 90^\circ$ . Скориставшись формулою (4.1), розрахуємо амплітуду вимушеної складової та амплітуду вільної складової напруги (рис.4.7). Максимальне значення перехідного процесу досягається у перший півперіод вільних коливань. Коли напруга вимушеного режиму не встигає значно змінитися в лінії.

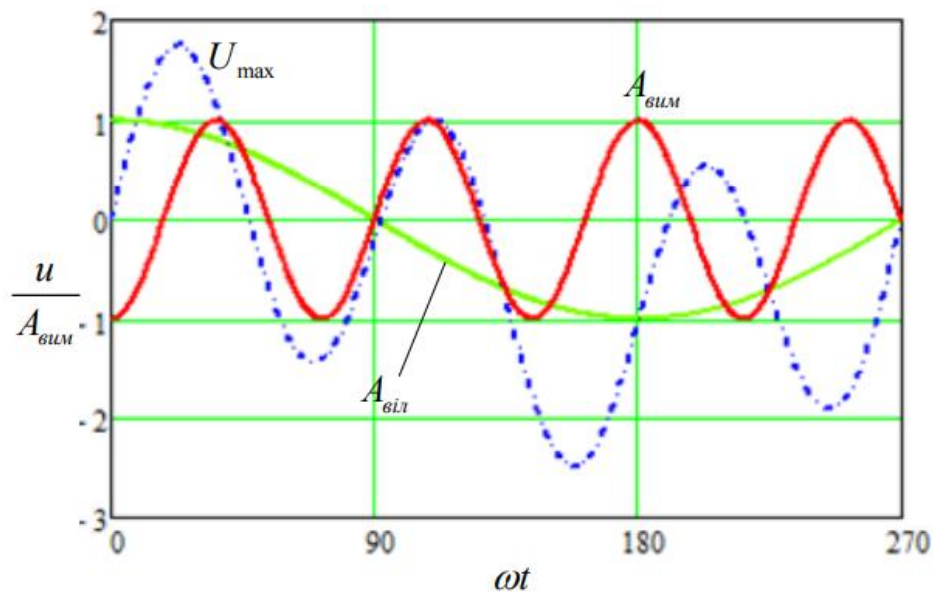


Рисунок 4.7 – Перехідний процес при підключенні КЛ до джерела  
( $\omega_1 / \omega = 5$ ): 1 – вимушена складова; 2 – вільна складова.

За умови  $\omega_1 / \omega = 2$  (рис.4.8), найбільше значення напруги досягається на другому максимумі, бо при такому співвідношенні частот через півперіоду промислової частоти амплітуди вимушеного режиму та вільної складової додаються.

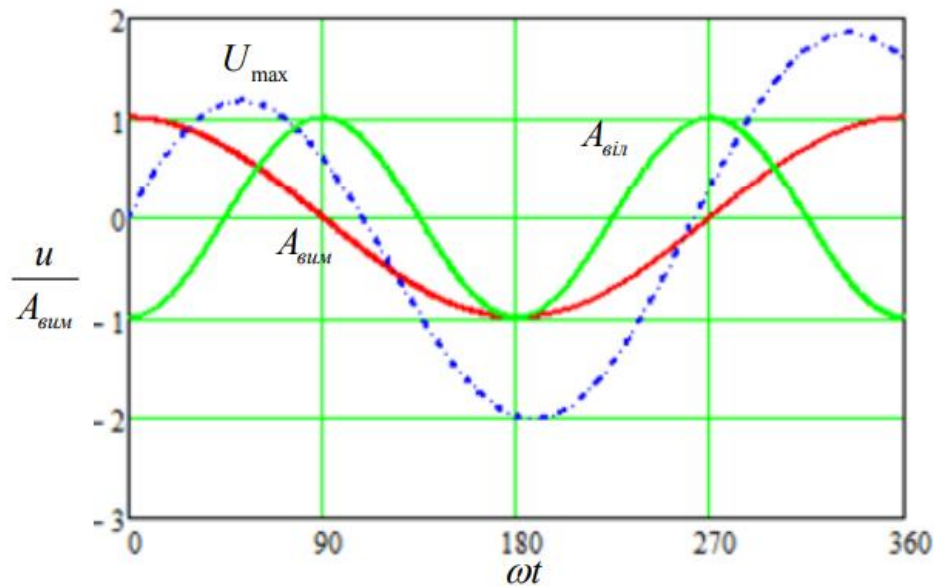


Рисунок 4.8 – Перехідний процес при підключенні КЛ до джерела  
( $\omega_1 / \omega = 2$ ): 1 – вимушена складова; 2 – вільна складова.

У дуже рідкісних випадках можливе виконання умови резонансу на промисловій частоті, при умові  $\omega_1 = \omega$ . При цьому напруга у коливальному контурі буде визначатися виразом

$$u(l, t) = E_m \frac{\omega L_e}{R} (1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.3)$$

Із (4.3) можна зробити висновок, що напруга поступово збільшується та досягає максимального значення у межах вимушеного режиму, яке дорівнює  $E_m \frac{\omega L_e}{R} = (10 \div 20) E_m$ . Це в декілька разів перевищує ЕРС джерела, що визначається високою добротністю контуру реальної лінії.

Розглянуті особливості перехідного процесу у простому коливальному контурі зберігаються і для лінії, в якій існує нескінченне число гармонік вільної складової.

При  $e(t) = A_{vim} \sin(\omega t + \varphi)$  напруга в кінці лінії

$$u(l, t) = A_{vim} \sin(\omega t + \varphi) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left( \frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

де  $\varphi_k = \arctg \left[ \frac{\omega_k}{\omega} \operatorname{tg} \varphi \right]$ ;  $\delta_k$  – коефіцієнт згасання.

Визначення коефіцієнта згасання  $\delta_k$  є непростим завданням. По даним вимірювання на діючих високовольтних КЛ середнє значення  $\delta_k$  може буде оцінено  $30 \text{ с}^{-1}$  (або  $0,1 \text{ рад}^{-1}$ ), що відповідає зменшенню амплітуди вільних коливань за період  $T$  промислової частоти на 45%.

Для реальних кабельних ліній електропередачі співвідношення власної частоти до промислової більше одиниці ( $\omega_1 / \omega > 1$ ). Проведений аналіз показав, що при  $\omega_1 / \omega > 1$  амплітуда вільної складової має найбільше значення при кутах ввімкнення, близьких до  $90^\circ$  або  $270^\circ$ . Якщо  $\omega_1 / \omega < 1$ , то амплітуда вільної складової буде найбільшою, коли кут ввімкнення  $\varphi$  близький до  $0^\circ$  або  $180^\circ$ .

Виникаючі при підключенні КЛ перехідний процес, в режимі холостого ходу, можна розглянути користуючись моделлю КЛ довжиною  $l=3000 \text{ м}$ , яка підключається до трифазного джерела синусоїдального ЕРС 330 кВ, реалізованої за методикою розділу 4 в пакеті Matlab/Simulink.

На рис. 4.9 показана осцилограми перенапруг в кінці КЛ без навантаження в режимі холостого ходу. З наведених кривих напруги  $u_B(t)$ ,  $u_C(t)$  видно, що амплітуда першої вільної складової більше амплітуди вимушеної складової. Максимальне значення амплітуди  $u_B(t)$  вимушеної і вільної складової збігаються, що і спостерігається в наведеному випадку.

Прояв коливальних властивостей в початковий момент часу пов'язано з зосередженими та розподіленими індуктивностями і ємностями. Це є однією з причин коливань електричної і магнітної енергії, яка зосереджені в реактивних елементах лінії, а так само взаємовпливу індукції між жилою і екраном однієї фази і жилами і екранами сусідніх фаз.



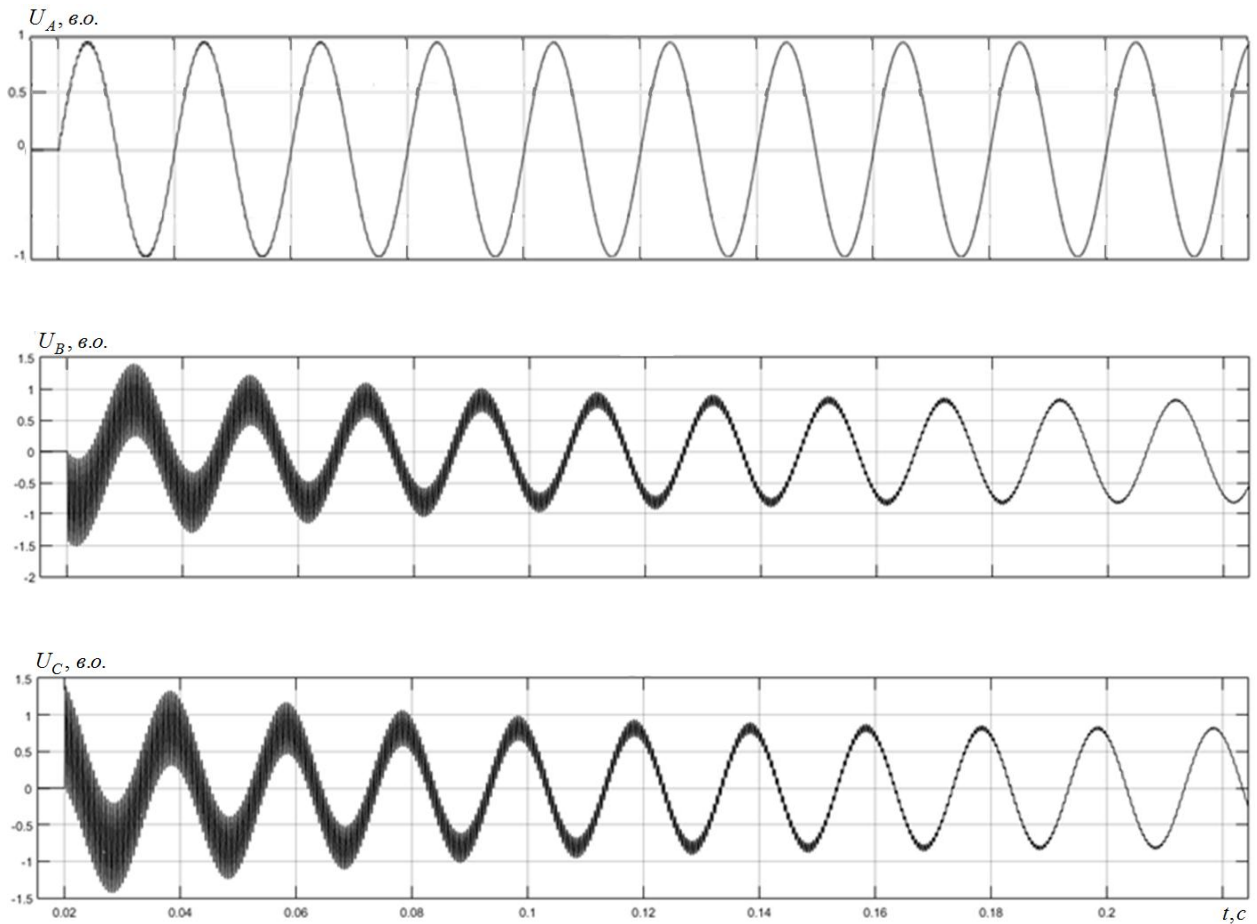


Рисунок 4.9 – Осцилограма перенапруг на вході КЛ  
в режимі холостого ходу.

Амплітуду вільних складових визначає кут включення максимальної напруги в кінці лінії і залежить від частоти власних коливань [134]. Найбільше значення вільної складової буде при початковій фазі комутаційної напруги, близьких до  $90^\circ$  або  $270^\circ$ , що видно з осцилограм рис. 4.10.

Видно, що чим більше початкова фаза напруги при комутації відрізняється від  $90^\circ$ , тим менше амплітуда власних коливань. Чим ближче частота власних коливань до частоти джерела, тим пізніше настає приблизний збіг максимумів усталеною і вільної складових, а отже, і амплітуди максимумів  $A_{\max}$  перехідного процесу.

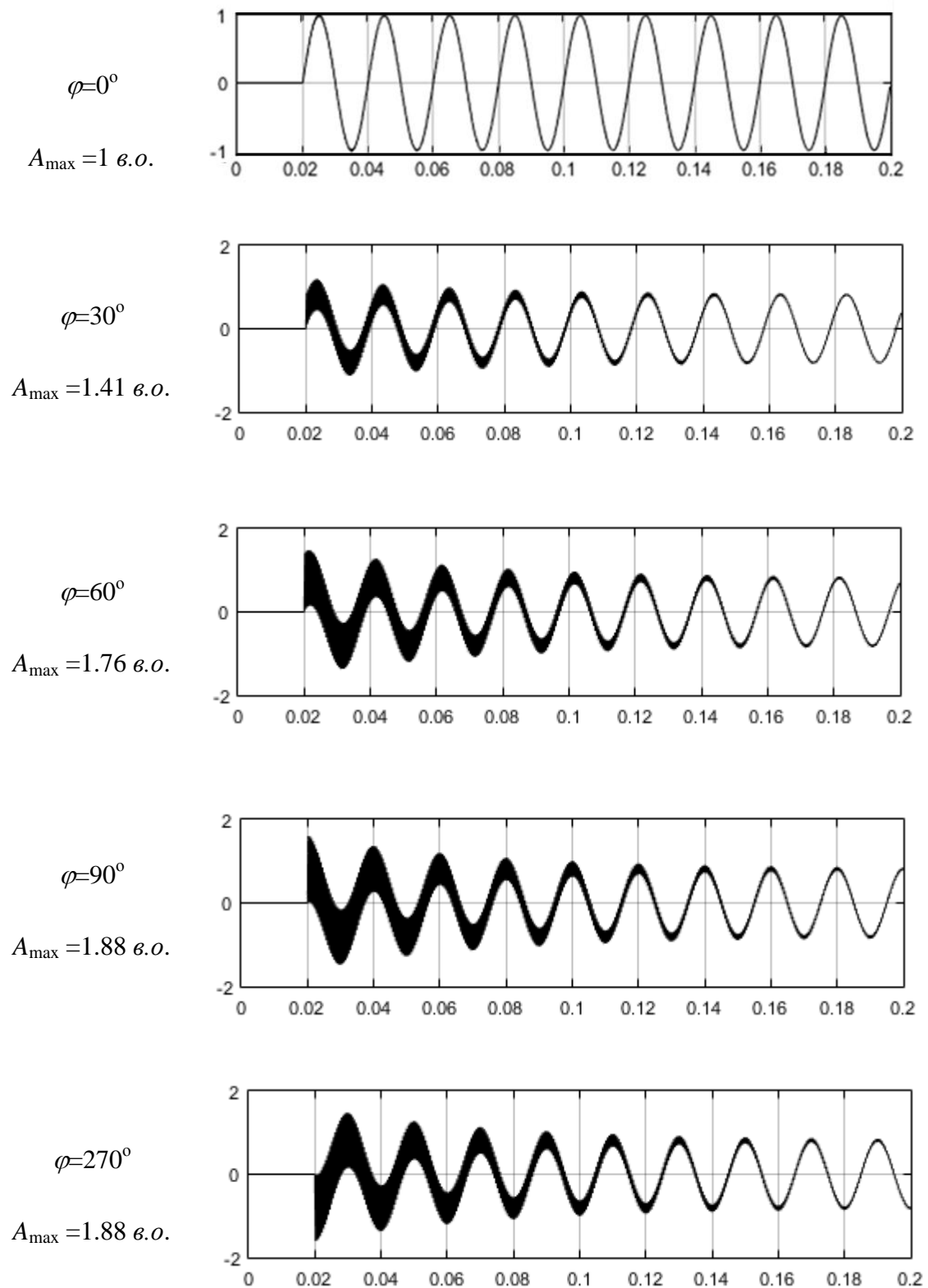


Рисунок 4.10 – Осцилограми напруги фази А при різних початкових фазах при комутаціях КЛ до джерела трифазного ЕРС

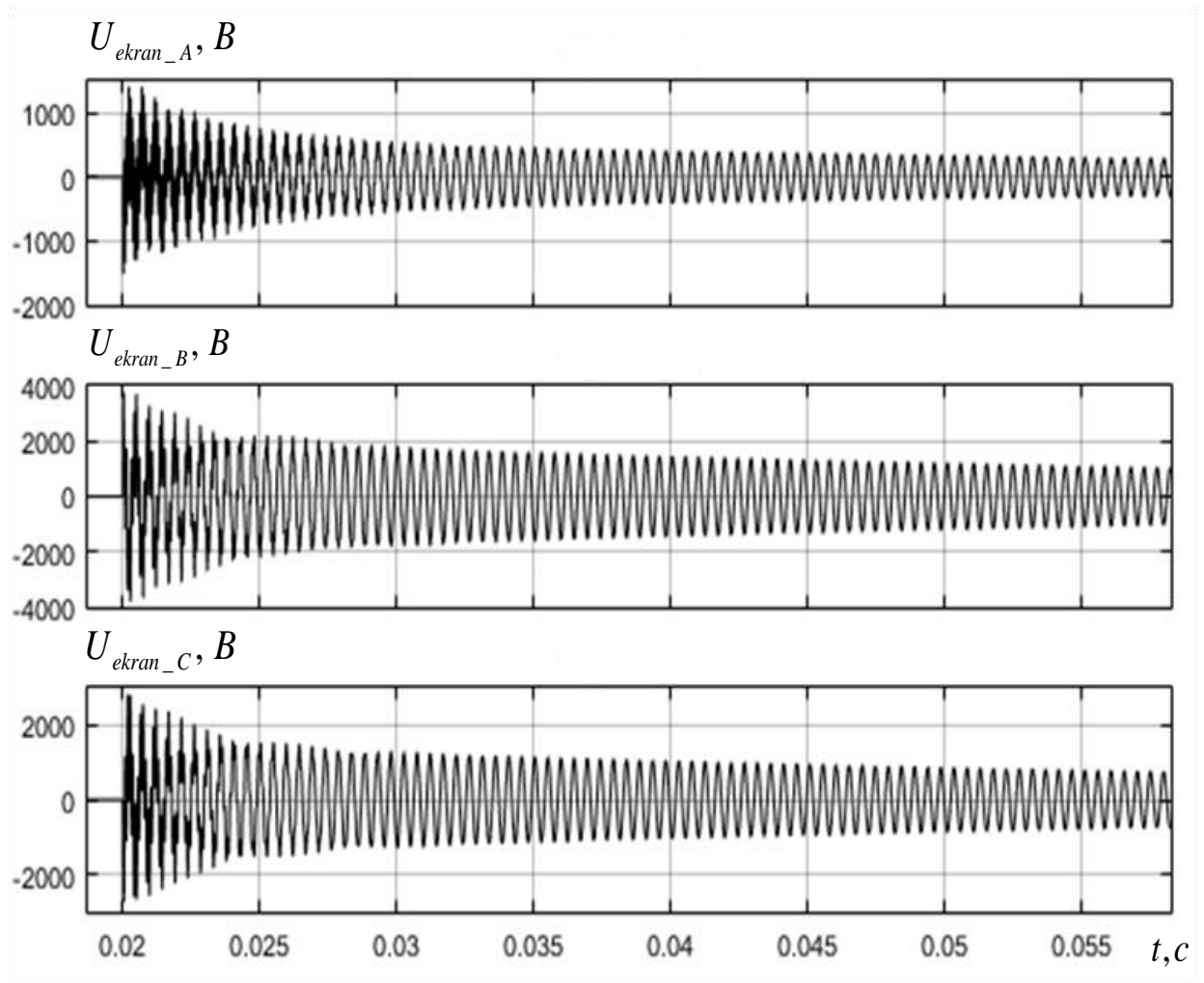


Рисунок 4.11 – Осцилограми перехідного процесу  
напруги в екранах однофазних кабелів

Криві перехідного процесу напруги і струму в екранах однофазних кабелів при включенні ненавантаженого КЛ до джерела в режимі холостого ходу, показані на рис. 4.11 і 4.12. З наведених осцилограм рис. 4.11 видно, що перенапруження на екранах КЛ в момент комутації досягають 4 кВ. Це пояснюється накладенням форми коливань різних частот, викликані впливом взаємоіндукції жил всіх фаз кабелю на екран. Швидке загасання перехідних явищ в екранах трифазної кабельної лінії однофазного виконання спостерігається через наявність активних складових всіх елементів.

Поява струмів обумовлено заземленням екранів в кінці і на початку КЛ. Так як в момент комутації, внаслідок магнітної зв'язку між жилою і екраном, що ЕРС взаємоіндукції збільшується, що сприяє протіканню струмів в екранах близько 280 А.

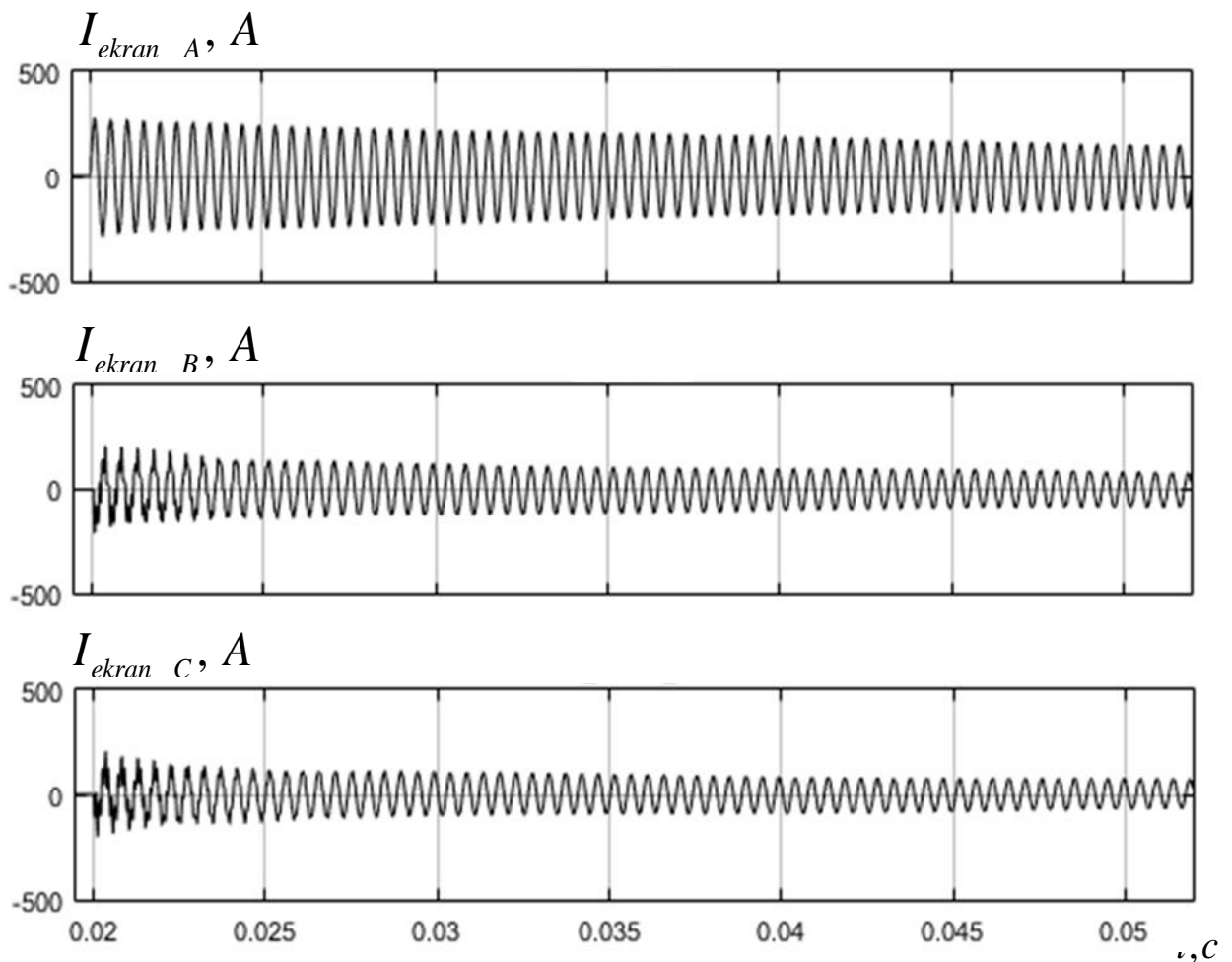


Рисунок 4.12 – Осцилограми перехідного процесу струму в екранах однофазних кабелів

Після затухання основних складових комутаційного перехідного процесу в жилах КЛ, що наводиться в контурі за рахунок взаємної індуктивності, ЕРС кожної жили зменшується, що призводить до загасання кривих напруги і струму в екрані кабелю до мінімальних значень.

### 4.3 Особливості урахування впливу початкової фази джерела електроживлення на електромагнітні процеси та перенапруги в колах довгої високовольтної трифазної кабельної лінії

Для обмеження комутаційних напруг застосовується принцип підбору сприятливих початкових умов перехідного процесу, при яких амплітуди вільних коливань мають мінімальні значення, наприклад управління моментом включення, шляхом зміни початкового кута кожної фази.

Розглянемо осцилограми перехідних процесів струмів і напруг в екранах трифазної кабельної лінії однофазного виконання при включенні КЛ до джерела трифазного напруги при зміні початкового кута [98, 135].

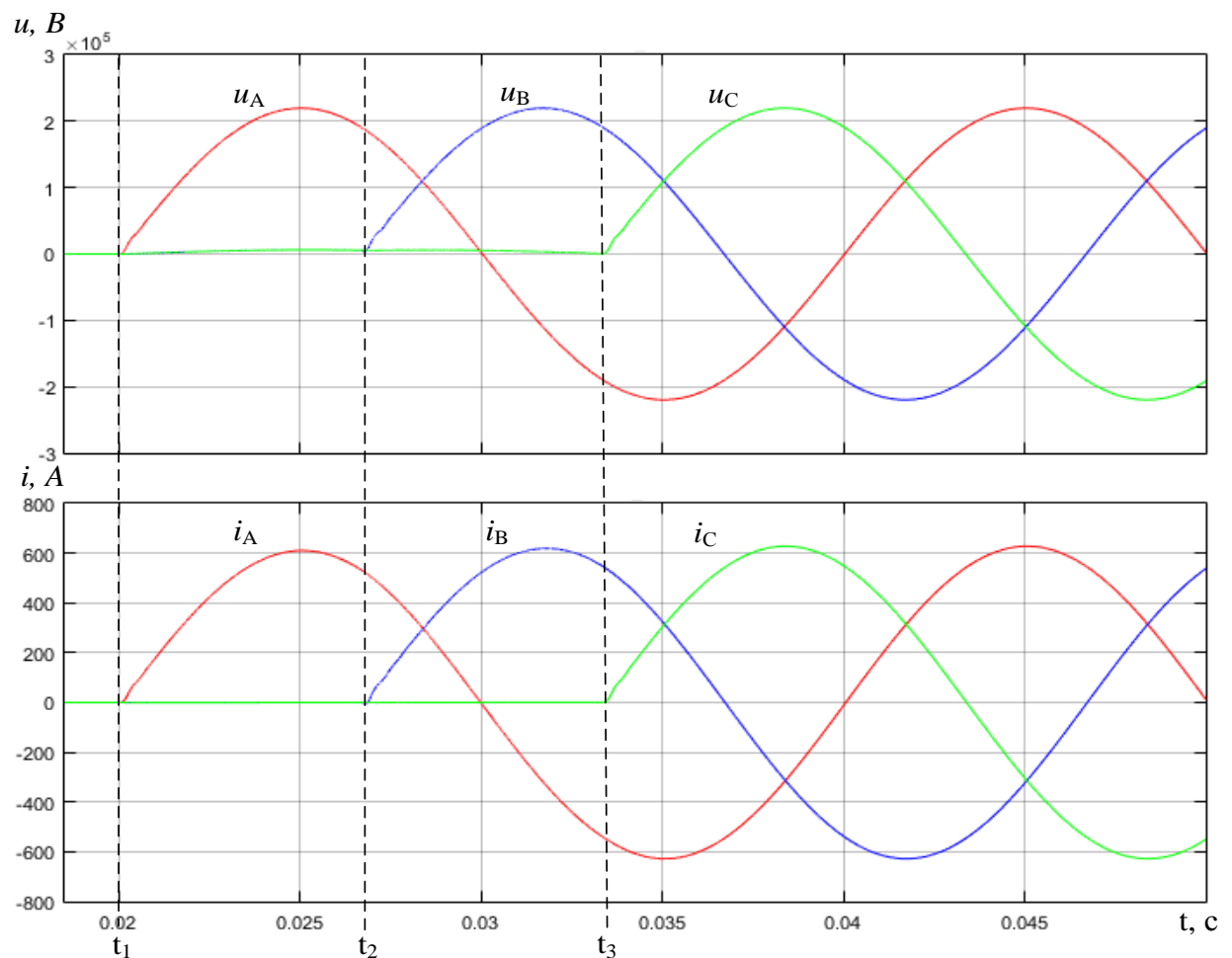


Рисунок 4.13 – Осцилограми напруги та струмів у трифазній кабельній лінії в момент підключення до джерела живлення при куті включення  $\varphi=0^\circ$

Комутація кожної фази відбувалася в різні моменти часу, так щоб кожна фаза мала початковий кут включення рівний нулю. Як було сказано вище, (параграф 4.2), що амплітуда вільної складової визначає кут включення. Так при куті включення  $\varphi=0^\circ$ , амплітуда фази має номінальне значення, що видно на осцилограмах рис 4.13.

Аналізуючи осцилограми рис.4.13, можна зробити висновок, що якщо кожен фазу трифазної кабельної лінії підключити до трифазного джерела частотою  $f=50$  Гц із затримкою за часом рівній  $1/150$  сек, то кут включення всіх фаз буде дорівнює нулю, що призведе до обмеження комутаційних напруг.

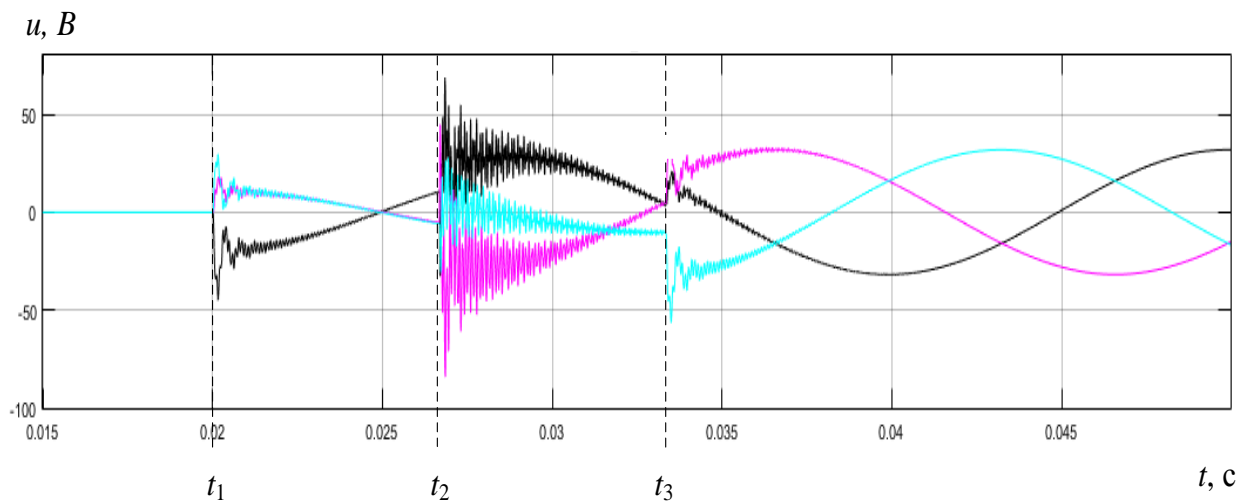


Рисунок 4.14 – Напряга в екранах трифазної КЛ  
при зміні початкового кута кожної фази

Зміна початкового кута кожної фази при комутації не впливає на підвищення напруги на екрані кабелю (рис 4.14, 4.15), але при цьому з'являються індуковані струми в екранах (рис. 4.16), криві перехідного процесу яких, підлягають дослідженню, щоб розуміти процеси, що відбуваються в екранах кабелю.

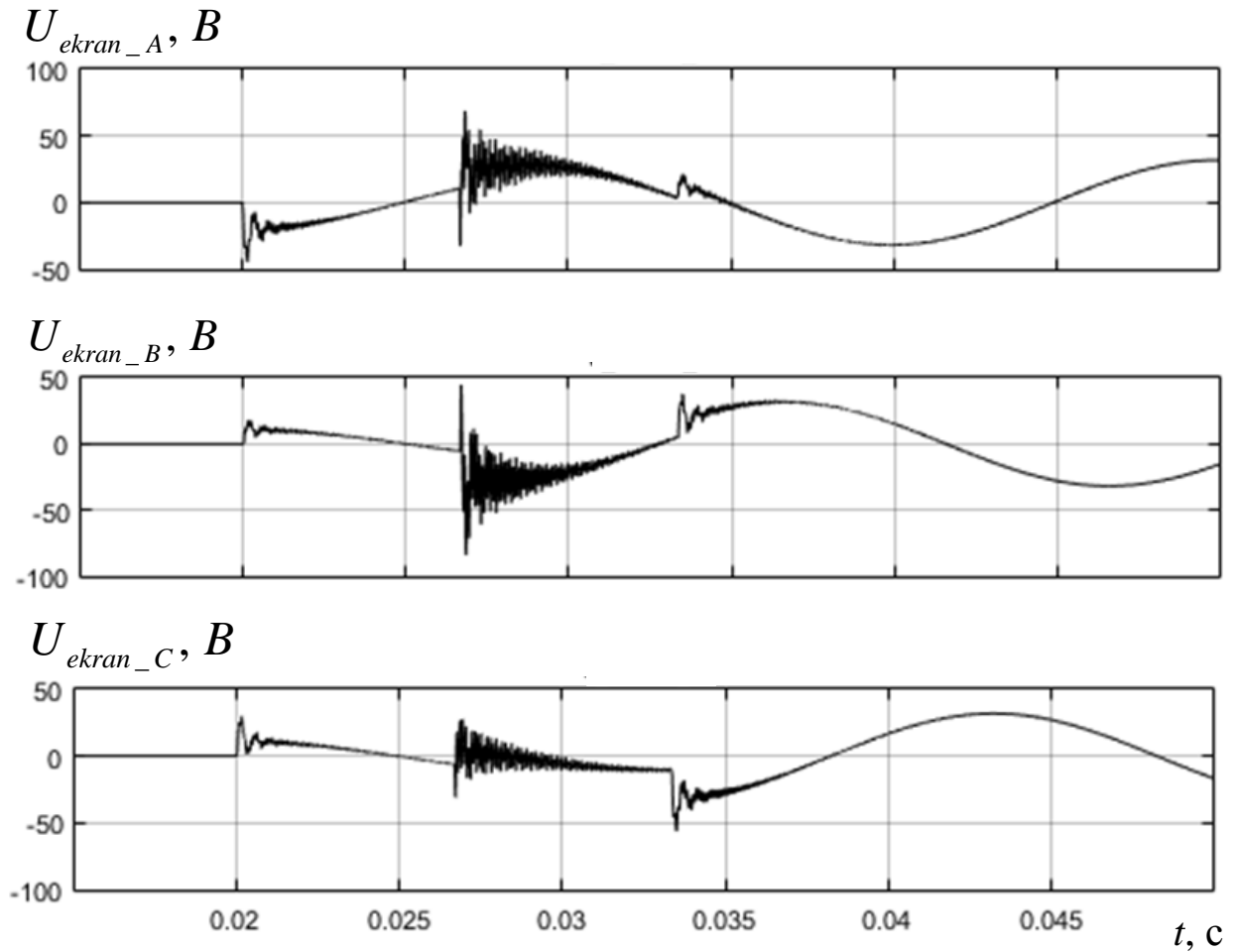


Рисунок 4.15 – Криві напруги в екранах кожної фази  
при зміні початкового кута

З рис. 4.14, 4.16 видно, що в перший момент часу при  $t_1$  включається фаза  $A$  і по струмопровідній жилі починає протікати струм, внаслідок чого навколо провідника створюється змінне магнітне поле, що призводить до появи струму в екрані рис. 4.16. Струм в екрані викликає падіння напруги своєї фази, під дією магнітної індукції, викликає падіння напруги на екранах фази  $B$  і  $C$  (рис 4.15). Так само, напруга на екранах фаз  $B$  і  $C$ , що не увімкнулися, обумовлено ємнісним і електромагнітним зв'язком з фазою  $A$ .

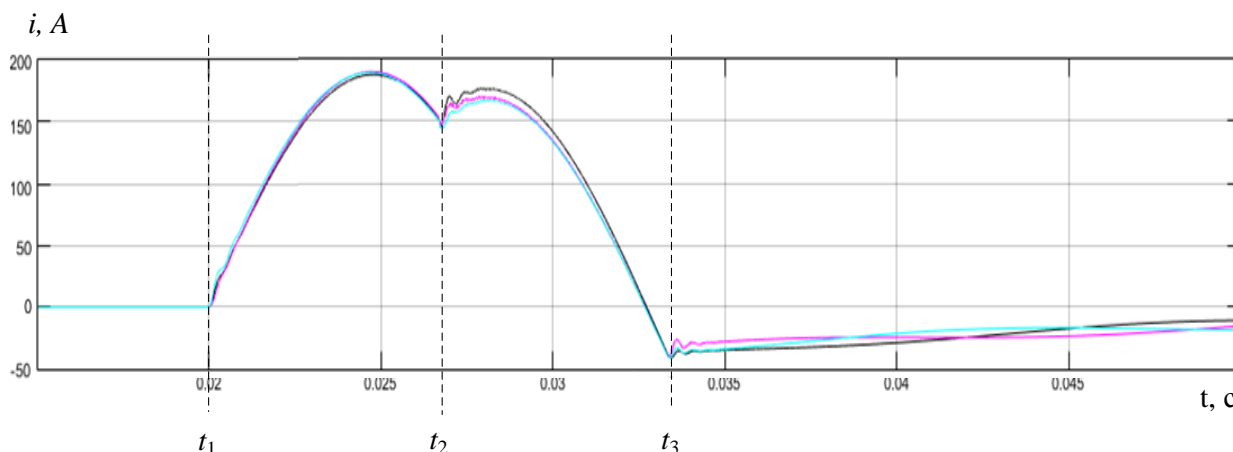


Рисунок 4.16 – Криві перехідних струмів при зміні початкового кута

У момент включення однієї фази, у всіх екранах кожної фази починають протікати індуковані струми. Так як діє тільки напруга фази  $A$ , то транспозиція екранів не компенсує ЕРС взаємоіндукції, що призводить до сильного збільшення струму.

У момент часу  $t_2$  підключається фаза  $B$ , що призводить до збільшення ЕРС взаємоіндукції на фазах. Це видно з осцилограми (рис 4.15), напруги  $u_A$  і  $u_B$  мають велику початкову амплітуду, в порівнянні з відключеною напругою  $u_C$ . Появи напруги на фазі  $B$ , в наслідок транспозиції екранів, компенсує поздовжні струми, що протікають через екрани, але не призводить до балансу фазних напруг.

У момент часу  $t_3$  всі три фази підключаються до лінії, а отже ЕРС взаємоіндукції, яка наводиться в екранах трьох ділянок транспозиції, внаслідок зсуву фаз на  $120^\circ$  і  $240^\circ$ , дорівнює нулю. Тому струми, що наводяться в екранах, після незначного перехідного процесу приймають значення близькі до нуля.

Коливання, викликані підключенням кожної фази в моменти часу  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  перезарядом ємностей, і електромагнітної зв'язком між жилами і екранами трифазних кабелів.



#### **4.4 Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі довгої трифазної кабельної лінії на напругу 330 кВ**

На сьогоднішній день в Україні вперше розроблено і знаходиться в стадії реалізації проект кабельної лінії електропередачі на напругу 330 кВ (КЛ 330 кВ) з ізоляцією із зшитого поліетилену, для електропостачання електросталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь" загальною довжиною лінії 13 км [71, 140–143].

Вибір кабелю такого типу для такої лінії 330 кВ відповідає світовій тенденції розвитку кабельних ліній електропередачі. В даний час в промислово розвинених країнах практично 100% ринку силових кабелів високої і надвисокої напруги 150 кВ і вище займають кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Зшитий поліетилен являє собою полімер, створений молекулами поліетилену, які з'єднані між собою додатковим поперечними зв'язками. Широке використання зшитого поліетилену в якості ізоляції силових кабелів обумовлено чудовими діелектричними властивостями (висока діелектрична міцність, низький  $\operatorname{tg}\sigma$ , низька діелектрична проникність  $\epsilon_r$ ) і високою температурною стабільністю, що дозволяє збільшити струмові навантаження, як в режимі експлуатації, так і режимі короткого замикання.

Розробка і реалізація спеціальних проектів таких надвисоковольтних трифазних кабельних ліній електропередачі потребує виконання значних попередніх науково-технічних розробок, електротехнічних розрахунків по вибору внутрішнього перерізу струмоведучих жил кабелю для забезпечення пропускної здатності у лінії, втратам напруги, допустимим тривалим навантаженням за умови нагріву у нормальних та аварійних режимах.



виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення.

Комп'ютерна модель кабельної лінії, що показана на рис. 4.18 і відповідає схемі прокладки рис. 4.17 складається з 9 ділянок, кожна з яких модулюється еквівалентними багатополюсниками, які є ланками довжиною  $l$  ланцюгової схеми заміщення (номер ділянки та довжина в метрах показані на рис. 4.17). Еквівалентні багатополюсники мають дванадцять полюсів (по шість з кожної сторони), що відповідають трьом струмоведучим жилам та трьом електромагнітним екранам кожної фази трифазної кабельної лінії. Полюси екранів з'єднуються по схемі транспозиції екранів кабелю.

Для того щоб забезпечити передачу по лінії заданої потужності навантаження 350 МВт, з дотриманням необхідних температурних режимів, потрібно кабель з номінальним перетином струмоведучих жили 800 мм<sup>2</sup>. Однак, на ряді ділянок вибраного перерізу недостатньо, так як питомий тепловий опір ґрунту і глибина прокладки кабелю по трасі відрізняються від базових. Для збільшення пропускної здатності кабелів застосовується транспозиція екранів кабелів по всій довжині лінії. При правильній організації транспозиції екранів (транспозиційна довжина кабелю розділена на три рівні частини) струми в екранах відсутні. На розглянутій кабельній лінії 330 кВ організувати ідеальну транспозицію не представляється можливим. На довжині лінії 11.5 км використовується два цикли транспозиції. Підходи КЛ до ТЕС (900 м) і ПС Грубна (600 м) організовані без транспозиції, крім того підходи заземлені тільки з одного боку, що може привести до великих напруженням на незаземленій кінцях. Це становить небезпеку для ізоляції кабелю. Також лінія проходить під залізною дорогою (близько 0,5 км) та під річкою Самарою (близько 0,5 км). Фази кабелю прокладаються зімкнутим трикутником, що зменшує паразитні втрати в

жилах кабелів. На ділянці кабельної лінії під залізною дорогою для забезпечення допустимих температурних режимів роботи, використовується кабель з перерізом струмоведучої жили  $1000 \text{ мм}^2$  [71, 140–143].

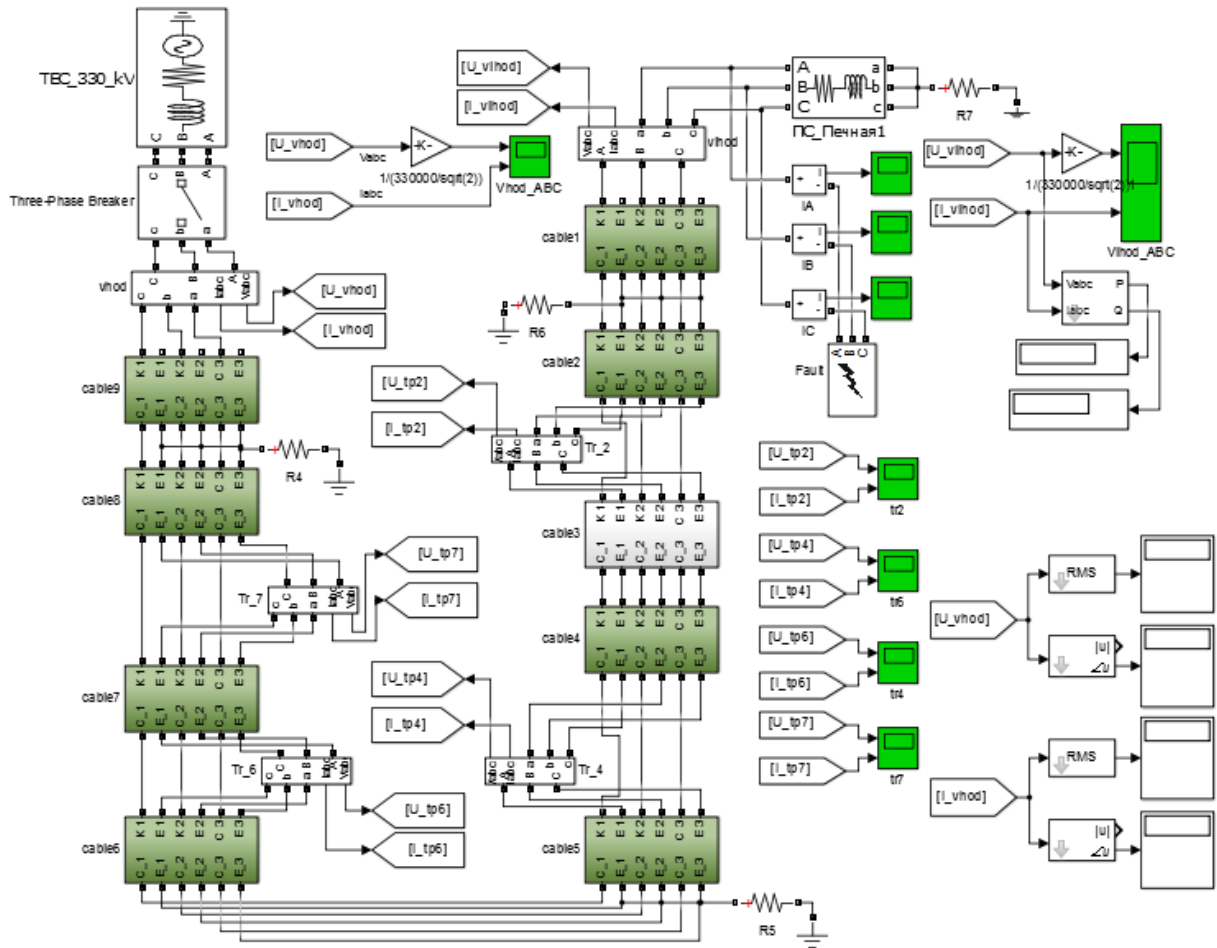


Рисунок 4.18 – Комп’ютерна модель трифазної кабельною лінією електропередачі 330 кВ

В комп’ютерній моделі (рис 4.18) на ділянках 2-5 та 6-8 виконувалася транспозиція екранів кабелів, довжини яких показані на рис. 4.17. Транспозиція не ідеальна і вибирається з умови, щоб в режимі однофазного короткого замикання напруга на екрані не перевищувала 3.5 кВ. Розрахунок параметрів лінії розраховувався по геометричним розмірам однофазного кабелю трифазної кабельної лінії, що наведені в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри кабелю з ізоляцією із зшитого поліетилену [71]

Основні характеристики	Марка кабелю	
	A2XS(FL)2Y 1x800 RM/150/190/330kV	A2XS(FL)2Y 1x1000 RM/150/190/330kV
Кругла жила з алюмінієвого скрученого дроту		
Мідний екран		
Площа поперечного перерізу жили, мм <sup>2</sup>	800	1000
Площа поперечного перерізу екрана, мм <sup>2</sup>	150	150
Зовнішній діаметр, мм	105	109
Діаметр жили, мм	34.8	38.5
Внутрішній радіус зовнішнього екрана, мм	42.8	43.85
Зовнішній радіус внутрішнього екрана, мм	19.3	21.15

Перехідні електромагнітні процеси, що відбуваються в високовольтній кабельній лінії напругою 330 кВ, досліджувались засобами комп'ютерного моделювання. За основу для комп'ютерної моделі взята схема прокладки, зображена на рис. 4.17. На рис.4.18 представлена відповідна Simulink-модель.

В режимі роботи лінії без навантаження (холостого ходу) (рис. 4.19) на вході лінії відбувається перехідний процес, протягом якого заряджаються всі ємнісні та індуктивні елементи лінії. В момент максимум напруги, напруги фази *B* (синій колір) та *C* (зелений колір) досягають 1.5 в.о., при частоті вільних коливань 620 Гц. Це пов'язане з початковим кутом включення.

Стрибок струму (рис. 4.20) досягає 2 кА, при усталеному режимі 150 А. Таке велике значення початкового струму, пов'язане з протіканням ємнісних

струмів, що протікають по контуру жила-екран-земля. Струм на виході лінії рівний нулю, що підтверджує, що весь струм який надійшов на вхід лінії замикається на землю через ємнісні контури.

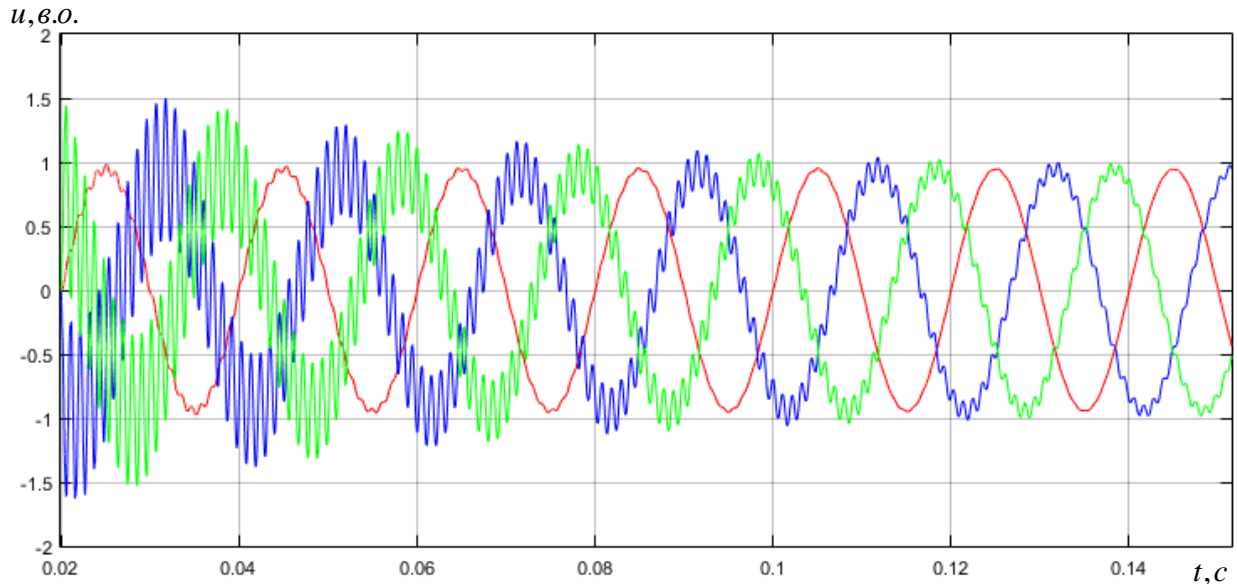


Рисунок 4.19 – Напруга на вході трифазної лінії в режимі холостого ходу

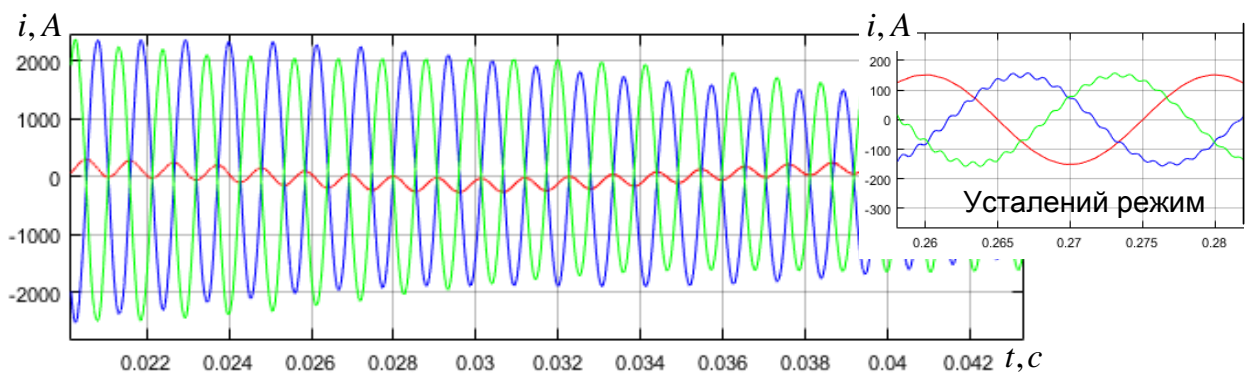


Рисунок 4.20 – Струм на вході трифазної лінії в режимі холостого ходу

При однофазному короткому замиканні (рис.4.21) напруга на пошкодженій фазі  $A$  зменшується із за падіння напруги на джерелі, а напруги в фазах  $B$  та  $C$  збільшуються до лінійних значень, у нейтральній точці потенціал рівний ЕДС пошкодженої фази.

В свою чергу амплітуда струму фази при однофазному короткому замиканні в перший момент часу досягає 26 кА (рис. 4.21), що наряду з

вимушеною складовою виникає вільна складова, що має аперіодичний характер. Як видно з осцилограмами, періодична складова струму короткого замикання фази А залишається незмінною протягом всього перехідного процесу. Завершення перехідного процесу визначається затуханням аперіодичної складової.

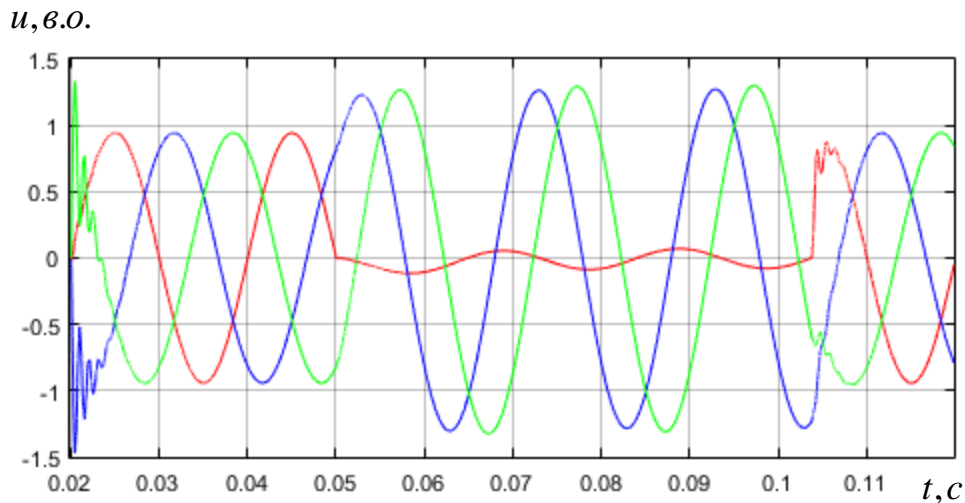


Рисунок 4.21 – Напруга в лінії при однофазному короткому замиканні

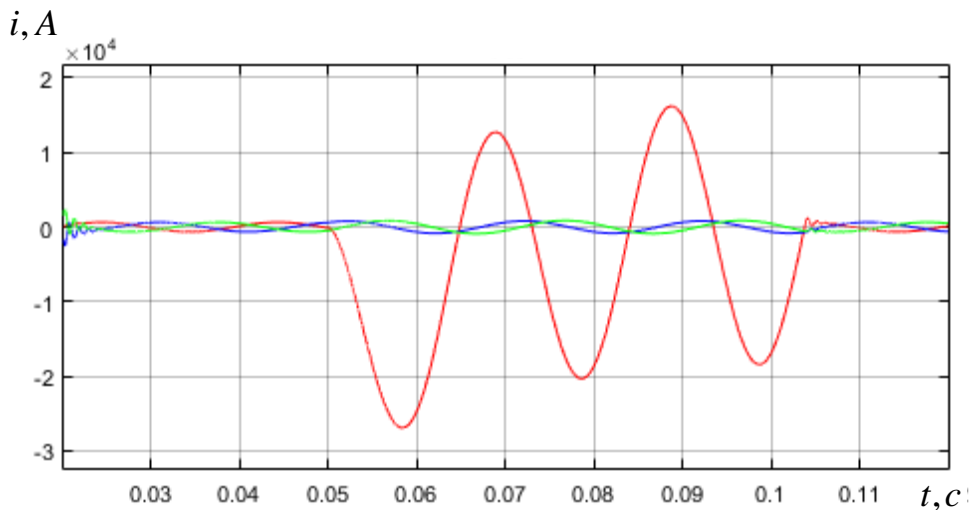


Рисунок 4.22 – Струм в лінії при однофазному короткому замиканні

Напруга в екранах у вузлах транспозиції 6 та 4 не перевищує допустимих значень 3,5 кВ (рис. 4.23, а). У вузлах 7 та 2, напруга приймає значення кВ. Підвищення напруги зумовлена тим, що ділянки 1 та 9 заземлені тільки з однієї сторони, тому потрібно вживати заходи для

обмеження таких напруг. Це питання потребує додаткового дослідження, що виходить за рамки даної роботи.

Струм в екранах з'являється в наслідок різної довжини ділянок транспозиції (рис. 4.23, б), що обумовлено неповною компенсацією індукованих струмів.

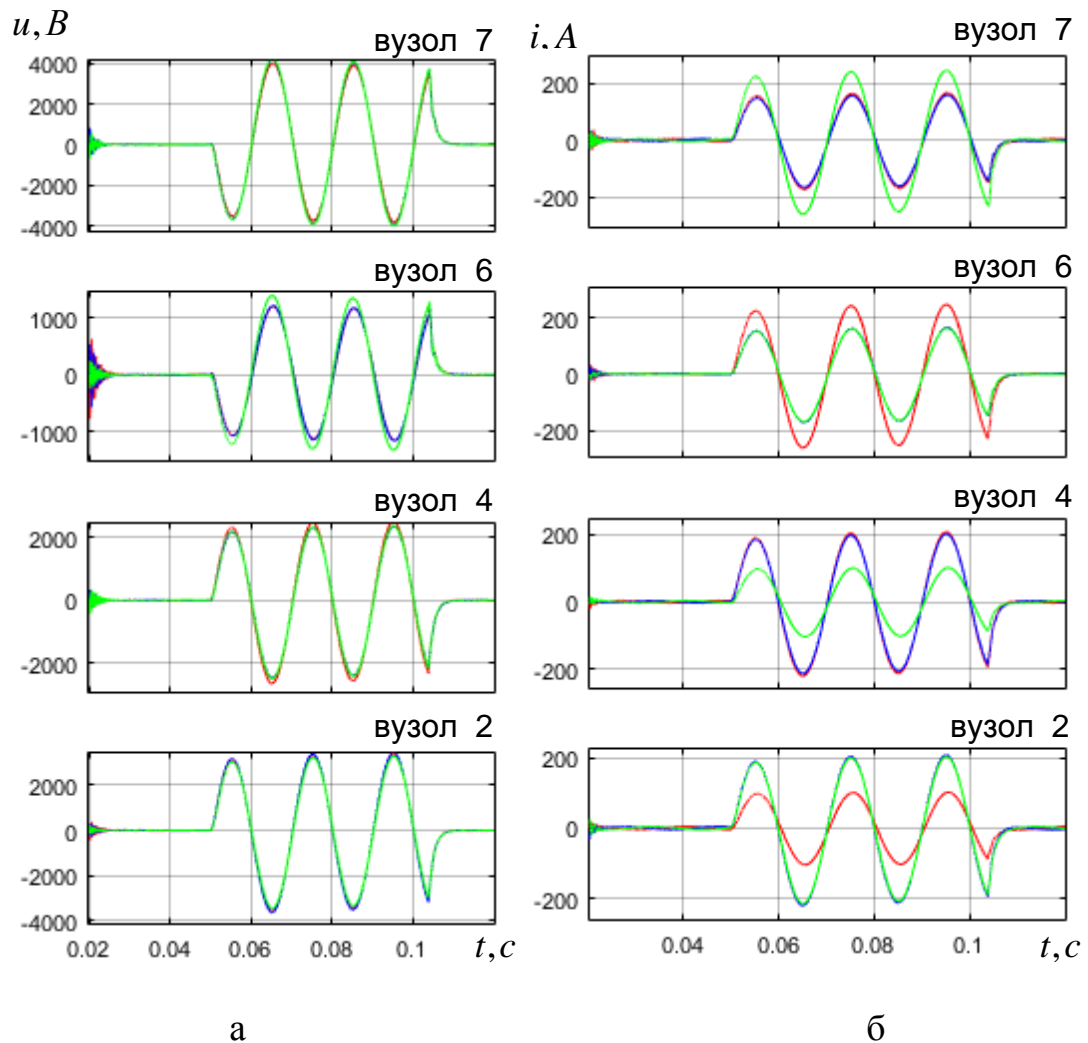


Рисунок 4.22 – Напруга і струм в екранах кабелів при однофазному короткому замиканні

При розрахунку лінії в режимі трифазного короткого замикання фази  $A$ ,  $B$  та  $C$  замикаються на землю. На рис. 4.23 показані напруги на вході кабельної лінії. Як видно із осцилограми величина напруги в момент



короткого замикання має високочастотну складову 2 кГц і далі за короткий проміжок часу зменшується.

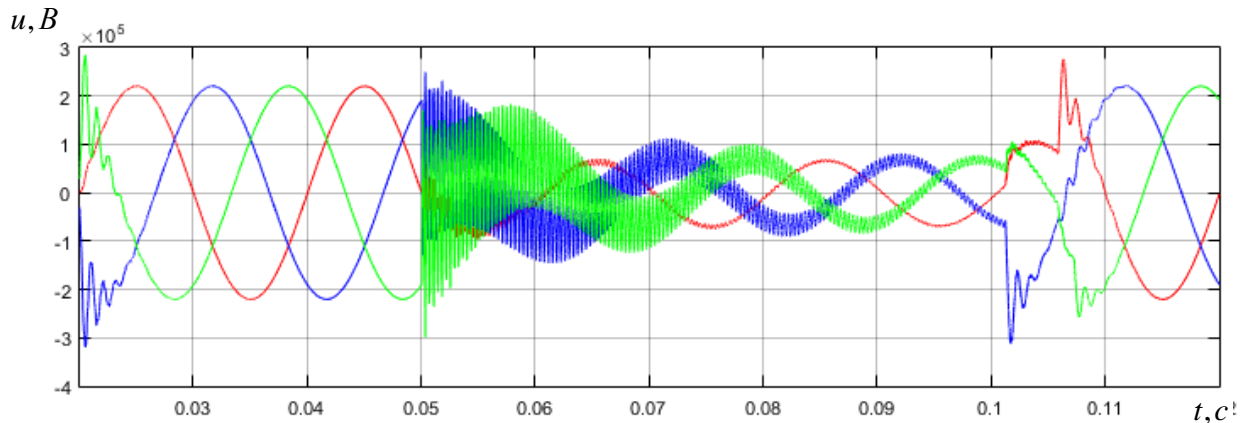


Рисунок 4.23 – Напруга на вході лінії при трифазному короткому замиканні

В режимі трифазного короткого замикання амплітуди струмів характеризуються більшими значеннями ніж струми однофазного КЗ (рис. 4.24), струм фази *A* рівний 60 кА. Аперіодична складова струму фази *A* визначається початковою фазою включення джерела. Найбільше значення досягається, коли в момент короткого замикання періодична складова проходить свій від'ємний максимум.

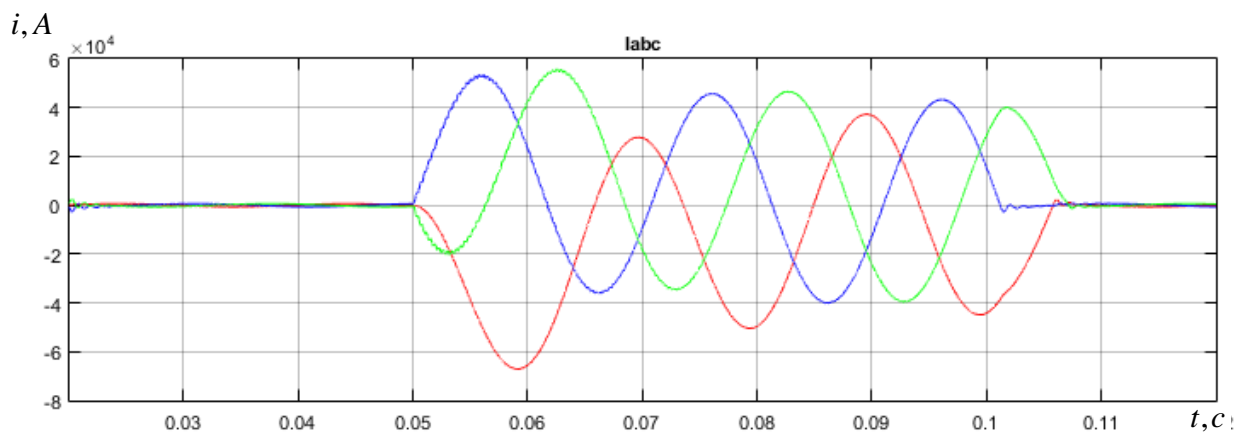


Рисунок 4.23 – Струм на вході лінії при трифазному короткому замиканні

Незважаючи на великі значення струмів в жилах в режимі трифазного КЗ, напруга на екранах кабелів в вузлах їх транспозиції характеризується меншими значеннями, ніж при однофазному КЗ (рис. 4.24). Це пов'язано з

близьким розташуванням трьох кабелів і наявністю сильної індуктивного зв'язку екранів з усіма трьома жилами.

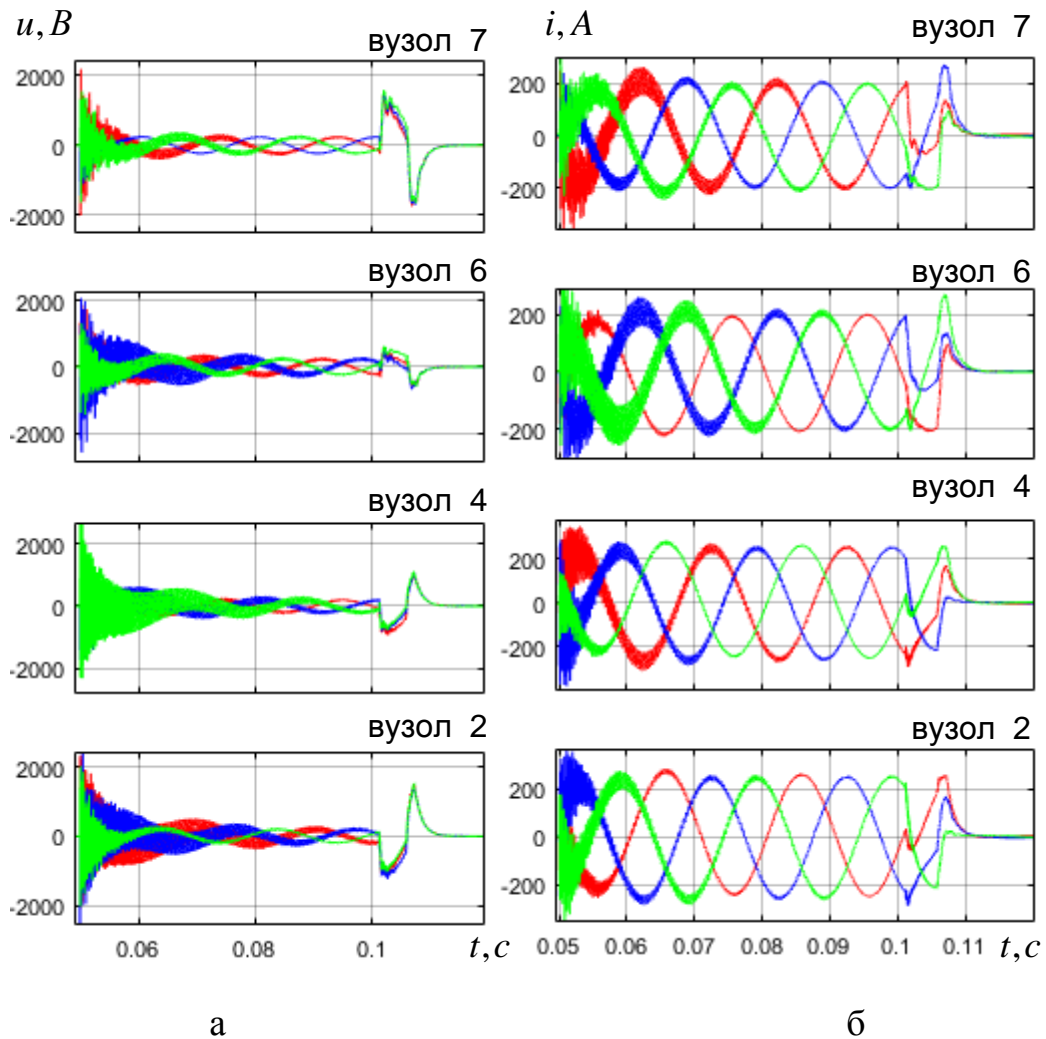


Рисунок 4.24 – Напруга і струм в екранах кабелів при трифазному короткому замиканні

Порівнюючи два аварійних режими однофазна та трифазне коротке замикання можна зробити висновок, що для вибору оптимальних довжин ділянок транспозиції екранів кабелів, необхідно розглядати однофазний режим КЗ як найбільш небезпечний.

Проведено дослідження комп'ютерної моделі для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у потужній електроенергетичній системі, що містить надвисоковольтну кабельну лінію з зшити-

поліетиленовою ізоляцією, яка реалізована у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink, дозволяє аналізувати різні режими роботи складних енергетичних систем з кабельними лініями, а на етапі їх проектування вибирати як раціональні схемно-конструктивні рішення, так і необхідне обладнання для захисту лінії в аварійних режимах роботи.

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

1. Проведено аналіз перехідних процесів при однофазному короткому замиканні, що дозволило розглянути зміни перехідних складових струмів і напруг кожної фази трифазного кабельної лінії електропередачі і оцінити рівень перенапруги і амплітуди струмів короткого замикання в екранах з урахуванням транспозиції.

2. Показано, що амплітуду вільних складових визначає кут включення максимальної комутаційної напруги залежить від частоти власних коливань. Визначено, що чим більше початкова фаза напруги комутації відрізняється від  $90^\circ$ , тим менше амплітуда власних коливань. Чим ближче частота власних коливань до частоти джерела, тим пізніше настає приблизний збіг максимумів усталеної і вільної складової, а отже, і амплітуди максимумів перехідного процесу.

3. Розглянуто осцилограми перехідних характеристик струмів в екранах трифазної КЛ однофазного виконання, при комутації КЛ до навантаження. Проведено аналіз умов появи струмів в екранах, обумовлених магнітним зв'язком, що виникає при взаємоіндукції між жилою і екраном одного і того ж кабелю і жилами сусідніх фаз.

4. Розглянуто осцилограми перехідних процесів струмів і напруг в екранах трифазної кабельної лінії однофазного виконання при включенні КЛ до джерела трифазного напруги при зміні початкового кута. При включенні кожної фази трифазного кабельної лінії до трифазного джерела з затримкою

у часі рівному 0.006(6) (1/150) секунди, то кут включення всіх фаз дорівнює нулю, що дає можливість обмежувати комутаційні напруги.

5. Зміни початкового кута кожної фази при комутації не призводить до підвищення напруги на екрані кабелю, але при цьому з'являються індуковані струми в екранах, криві перехідного процесу яких, підлягають додатковому дослідженню, для аналізу процесів, що відбуваються в екранах кабелю.

6. У комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink змодельовано перехідні електромагнітні процеси у потужній електроенергетичної системи, що містить надвисоковольтну кабельну лінію на напругу 330 кВ з зшито-поліетиленовою ізоляцією, що дозволяє аналізувати різні режими роботи складних енергетичних систем з кабельними лініями, а на етапі їх проектування вибирати як раціональні схемно-конструктивні рішення, так і необхідне обладнання для захисту лінії в аварійних режимах роботи.

7. Проведено розрахунки конкретної кабельної лінії на 330 кВ протяжністю 13 км, вперше прокладеної в Україні для електропостачання електросталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь". Проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Це дозволяє рекомендувати результати дисертації для розробки методик визначення допустимих і аварійних режимів аналогічних трифазних кабельних ліній електропередачі та вибору раціональних схемо-конструктивних рішень при їх проектуванні.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне наукове завдання розвитку методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів при різних підключеннях до мережі електроживлення.

Отримані нові наукові результати у своїй сукупності мають важливе значення для розвитку теоретичної електротехніки в напрямку розвитку теорії розрахунку багатофазних електричних кіл з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками, зокрема довгих високовольтних кабельних ліній електроенергетичного призначення.

Основні результати дисертаційного дослідження:

1. На підставі аналізу відомих наукових публікацій обґрунтовано необхідність удосконалення методів аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах із розподіленими параметрами і міжфазними взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополюсниками з відповідними зосередженими параметрами.

2. Розвинуто метод аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і взаємоіндуктивними та ємнісними зв'язками шляхом їх представлення багатополюсниками із відповідними зосередженими параметрами, які враховують особливості міжфазних зв'язків і перехідних процесів у первинних колах. Це забезпечило

удосконалення методів розрахунку допустимих електромагнітних параметрів у вказаних колах при різних їх підключеннях до мережі електроживлення.

3. Розроблено нову математичну модель трифазних кіл із розподіленими параметрами та взаємоіндуктивними і ємнісними зв'язками на основі складання диференціальних рівнянь стану електричних кіл з багатополюсниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов появи перехідних процесів у нормальних і аварійних режимах підключення таких кіл до мережі електроживлення. Використання такої моделі спрощує визначення недопустимих струмів у трифазних колах із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками.

4. Удосконалено математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополюсників з відповідними узгодженими параметрами і врахування впливу наведених ЕРС на індуковані струми в екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні перерізи струмопровідних екранів фазних кабелів та умови їх транспозиції.

5. Вперше на основі аналізу змінення напруг і струмів при виникненні перехідних процесів у трифазних колах типу довгих кабельних ліній електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначено особливості появи власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях. Урахування виявлених особливостей дозволяє уточнювати умови виникнення і обмеження недопустимих напруг та струмів при різних умовах підключення кабельних ліній до трифазної мережі електроживлення.

6. Розвиток методів аналізу перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на основі представлення таких кіл багатополіусниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів та визначення граничних і початкових умов появи перехідних процесів та їх розрахунку з використанням програми Matlab Simulink забезпечує спрощення визначення їх особливостей та уточнення кількісних характеристик.

7. Обґрунтованість і достовірність висновків, наукових положень роботи та рекомендацій підтверджено їх узгодженням з експериментальними результатами відомих організацій і публікаціями українських та іноземних вчених та їх використанням в методичних виданнях РД К28-006:2013 та РД К28-007:2017, що зазначено у відповідному акті використаних результатів роботи.

Для додаткової верифікації отриманих результатів у дисертації у середовищі Matlab Simulink було створено комп'ютерну модель кабельної лінії довжиною майже 13 км на напругу до 330 кВ і проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Отримані результати щодо визначення допустимих струмів і напруг в екранах фазних кабелів лінії та вибраних її проектантами транспозицій екранів відрізняються не більше ніж на 3%. Це дозволяє рекомендувати результати дисертації для розробки методик визначення допустимих і аварійних режимів аналогічних трифазних кабельних ліній електропередачі та вибору раціональних схемо-конструктивних рішень при їх проектуванні.

8. Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розвитку теорії перехідних процесів в трифазних кабельних лініях, які моделюються як кола з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками

використано на заводі «Південкабель», в Інституті електродинаміки НАН України та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб, І. А. Курило, В. І. Шеховцов, Н. А. Шидловська. Київ: Політехніка, 2004.– Т. 1. – 272 с., 2008.– Т. 2. – 224 с., 2013.– Т. 3. – 244 с
2. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. СПб.: Питер, 2003. – Т. 1. – 463 с., Т. 2. – 576 с. и Т. 3. – 377 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергоатомиздат, 1989 – 580 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
5. Круг К.А. Основы электротехники. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 432 с.
6. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
7. Резинкина М.М., Щерба А.А. Диагностика и мониторинг высоковольтных силовых электрических кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Техн. електродинаміка. Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність, 2006. Ч. 5. С. 84–87.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ. Техн. електродинаміка, 2008. № 6. С. 7–13.

9. Кирик В. В., Циганенко Б. В., Яндульський О. С. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи: монографія. Київ: КПІ ім. Сікорського, 2018. 226 с.
10. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. И., Баженов В. А. Оптимизация режимов электрических сетей. К.: Наукова думка. 1992. 216.
11. Денисенко Г. И., Держко М. Ф., Перхач В. С. Программная реализация алгоритмов анализа переходных процессов в электропередачах пульсирующего, переменного и постоянного токов. Электр. сети и системы. Львов, 1974. Вып. 17. С. 60-67
12. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Нетребський В. В., Тептя В. В. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці: монографія. / за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця: ВНТУ, 2014. 212 с.
13. Півняк Г. Г., Винославський В. М., Рибалко А. Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання. Підручник для вузів / під ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. Вид. 2-е. Дніпропетровськ: НГА України, 2000. 597 с.
14. Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
15. Горнштейн В. М., Крумм Л. А., Вычислительная техника в управлении режимами энергосистем. Электричество, 1977. № II. с.13 – 18.
16. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
17. Базуткин В. В., Дмоховская Л. Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
18. Левинштейн М. Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. Л: Энергия, 1972. 360.

19. Wedepohl L.M., Welcox D.J. Transient analysis of underground power transmission systems. *Proc. Inst. El. Eng*, 1973. vol. 120, №2. P. 253–260.
20. Anderson R. J. et al. Comparing lumped and distributed parameters models in transmission lines during transient conditions. *IEEE PES T and D Conference and Exposition*, 2014. P. 1-5.
21. Nagaoka N., Ametani A. Transient Calculations on Crossbonded Cables. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983. Vol. 102, № 4, P. 779-787.
22. Heaton A. G., Issa A. M. H. Transient response of crossbonded cable systems. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1970. Vol. 117, № 3, P. 578-586.
23. Наумкин И. Е., Челазов А. А. и др. Общая концепция и принципы реализации интерактивной графической среды для расчета параметров сложных энергетических сетей. *Вычислительные технологии*, 1998. Т. 3, №3. С. 35 – 47.
24. Noda T. Numerical techniques for accurate evaluation of overhead line and underground cable constants. *IEEEJ Trans*, 2008. Vol. 3. P. 549–559.
25. Papagiannis G. K., Tsiamitros D. A., Labridis D. P., Dokopoulos P. S. Direct numerical evaluation of earth return path impedances of underground cables. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib*, 2005. Vol. 152, № 3, P. 321–327.
26. Uribe F. A. Assessing closed-form approximations for underground cable earth impedances. *Proc. IEEE PES Gen. Meet*, 2003. Vol. 1, P. 654.
27. Rusek, A., Ganesan S., Aloï N. A Friendly Approach to Transient Processes in Transmission Lines. In *Proceedings of the 2011 ASEE North Central and Illinois-Indiana Section Conference*, Mount Pleasant. (MI. USA. 1–2 April 2011) MI, 2011.

28. Snelson J. Propagation of travelling waves on transmission lines—Frequency dependent parameters. *IEEE Trans. Power Appar. Syst*, 1971.
29. Meyer W.S., Dommel H.W. Numerical Modelling of Frequency-Dependent Transmission-Line Parameters in an Electromagnetic Transients Program. *IEEE Trans. Power Appar. Syst*, 1974.
30. Noda T. Application of Frequency-Partitioning Fitting to the Phase-Domain Frequency-Dependent Modeling of Overhead Transmission Lines. *IEEE Trans. Power Deliv*, 2015.
31. Schmidt U., Shirvani A., Probst, R. An improved algorithm for determination of cable parameters based on frequency-dependent conductor segmentation. In *Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference*. (Montevideo. Uruguay. 3–5 September 2012). Montevideo, 2012. P. 241–246.
32. Schmidt U. Frequenzabhängige Parameter von Kabeln zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen im Zeitbereich. Dissertation. Technische Universität Chemnitz. Ilmenau. Germany, 2013.
33. Chrysochos A. I., Papadopoulos T. A., Papagiannis G. K. Robust Calculation of Frequency-Dependent Transmission-Line Transformation Matrices Using the Levenberg Marquardt Method. *IEEE Trans. Power Deliv*, 2014. P. 1621–1629.
34. Hoshmeh A., Malekian K., Schufft W., Schmidt U. A single-phase cable model based on lumped-parameters for transient calculations in the time domain. In *Proceedings of the 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2015)*. (Rome. Italy. 10–13 June 2015) Rome, 2015. P. 731–736.
35. Shaban M., Salam M. A., Ang S.P., Voon W. Induced sheath voltage in power cables: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2016, P. 1236–1251.

36. Andreas C., Konstantinos A., Dimitrios C., Dimitrios K., Konstantinos P., Konstantinos T., Georgios G. Capacitive and Inductive Coupling in Cable Systems—Comparative Study between Calculation Methods. In Proceedings of the JICABLE. (Versailles. France. 23–27 June 2019) Versailles, 2019. P. 1–6.
37. Santos M., Calafat M.A. Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, 2019. P. 1–16.
38. Noufal S., Andres G. Induced sheath voltage and currents in cross-bonded power cables with consideration of improper connection of bonding leads. In Proceedings of the JICABLE. (Versailles. France. 23–27 June 2019) Versailles, 2019. P. 1–6.
39. Chmouri M. A practical method to compute the metallic sheath circulating current for nonstandard cases. In Proceedings of the JICABLE. (Versailles. France. 23–27 June 2019) Versailles, 2019. P. 1–6.
40. Cervantes M., Kocar I., Mahseredjian J., Ramirez A. Partitioned Fitting and DC Correction for the Simulation of Electromagnetic Transients in Transmission Lines/Cables. *IEEE Trans. Power Deliv*, 2018. P. 3246–3248.
41. Cervantes M., Kocar I., Mahseredjian J., Ramirez A. Partitioned Fitting and DC Correction in Transmission Line/Cable Models. In Proceedings of the International Conference on Power System Transients. (Perpignan. France. 16–20 June 2019) Perpignan, 2019. P. 1–6.
42. Lin Y., Xu Z. Cable Sheath Loss Reduction Strategy Research Based on the Coupled Line Model. *IEEE Trans. Power Deliv*, 2015. P. 2303–2311.
43. Goertz M., Wenig S., Hirsching C., Kahl M., Suriyah M., Leibfried T. Analysis of Extruded HVDC Cable Systems Exposed to Lightning Strokes. *IEEE Trans. Power Deliv*, 2018. P. 3009–3018.

44. Working Group B1.30 Cable systems electrical characteristics. CIGRE. Tech. Rep. Apr. 2013.
45. Han Y. J., Lee H. M., Shin Y. Thermal aging estimation with load cycle and thermal transients for XLPE-insulated underground cable. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP). Fort Worth, TX, 2017. P. 205-208.
46. F. Barakou L., Wu P.A.A.F., Wouters E. F. Steennis Investigation of the Necessary Modeling Depth in Transmission Systems with Mixed OHL-Cable Configuration. International Conference on Compatibility Power Electronics and Power Engineering, 2016. P. 70-75.
47. Kersting W. H. Distribution System Modeling and Analysis, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC, 2001.
48. Becker L. H., Cloete J. H., Reader H. C. Radio frequency coupling between an antenna and two unshielded parallel wires above a metal sheet-measurement precautions. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2001. Vol. 43, № 1. P.85–88.
49. Thue W. A. Electrical Power Cable Engineering, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC, 2003.
50. Choi M.-S., Lee D.-S., Yang X. A line to ground fault location algorithm for underground cable system. KIEE Trans. Power Eng., 2005. P. 267–273.
51. Choi M.-S., Lee S.-J., Lee D.-S., Jin B.-G. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems. IEEE Trans. Power Del., 2004. Vol. 19, № 1. P. 35–41.
52. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефекта. Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. 2010. Вип. 25. С. 126–132.

53. Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции. Техн. електродинаміка. 2010. № 2. С. 3–10.
54. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. и др. Анализ электромагнитных и тепловых процессов в трехжильном силовом кабеле на напряжение 10 кВ. Техн. електродинаміка. Тем. вип. 2006. Ч. 5. С. 77–81.
55. Резинкна М.М., Щерба А.А. Диагностика и мониторинг высоковольтных силовых электрических кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Техн. електродинаміка. Темат. вип. 2006. Ч. 5. С. 84–87.
56. Золотарев В.В., Карпушенко В.П., Науменко А.А., Бузько С.В. Физические и компьютерные технологии. 2006. С. 239–240.
57. Кадомская К.П. Электромагнитные процессы в кабельных линиях высокого напряжения. Новосибирск: НГТУ, 1997. 141 с.
58. Gudmundsdottir U.S., Bak C.L., Wiechowski W. Modeling of long high voltage AC underground cables. In Proceedings of the Danish PhD Seminar on Detailed Modelling and Validation of Electrical Components and Systems. 2010. pp. 16-22.
59. Римский В.К., Берзан В.П., Пацюк В.И., Карчева Н.Ф., Андрос И.В. Волновые явления в неоднородных линиях. Том IV: Параметрические цепи. Кишинев: Академии наук Молдовы, 2008. 560 с.
60. Ball E.H., Ochini E., Luoni G. Sheath overvoltages in high-voltage cables resulting from special sheathbounding's connections. IEEE Trans. 1965. Vol 84, № 10. pp. 974–988.
61. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1978. 191с.

62. Харкевич А.А. Неустановившиеся волновые явления. М.: Гос. Изд.во технико-теоретической литературы, 1950. 202с.
63. Стахів П.Г., Коруд А.В. Застосування діакоптичних методів для моделювання неоднорідних електричних схем. Вісник НУ «Львівська політехніка» Львів, 2001. № 435. С.118–124.
64. Демирчан К.С. Матричный метод расчета электрических цепей при помощи интеграла Дюамеля. Энергетика. 2002. № 3. С. 7–17.
65. Безносова О. И., Семагина Э. П. Обобщенный подход к моделированию электрических цепей с разнородными элементами. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2010. Вип. 11. С. 147-153.
66. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАНУ, 2011. 256 с.
67. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАНУ, 2015. – 305 с.
68. Золотарев М.В. Обозный А.Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей. Вісник НТУ ХПІ. 2006. Вип. 34. С. 129–132.
69. Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Васи́лець Л.Г., Чу́лєєва О.В., Надійність кабельно-провідникової продукції. Методи підтвердження на основі експериментальних досліджень. Вісн. НТУ «ХПІ». 2006. Вип. 34. С. 3-12.
70. Мещанов Г.И. Перспективы и направления развития производства кабелей и проводов энергетического назначения. Кабели и провода. 2007. №3 (304). С. 22-35.



71. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. Электрические сети и системы. 2009. №3. С. 16–21.
72. Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.В. Самонесущие изолированные и высоковольтные защищенные. Киев: Сучасність, 2008. 292 с.
73. Кри С.Х., Гессенс Т., Кьелквист Е.Б., Мендельсон А., Гау И. Новые материалы для производства кабелей высокого напряжения. Кабели и провода. 2009. № 1 (314). С. 26–30.
74. Щерба А.А., Гурин А.Г., Ольшевский А.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Новая технология пероксидной сшивки полиэтиленовой изоляции – основа производства высоконадежных силовых кабелей на напряжение 6 – 500 кВ. Электропанорама. 2012. № 3. С. 16–21.
75. Мендельсон А., Аартс М.У. Мировой опыт применения изоляции из триингостойкого сшитого полиэтилена. Кабели и провода. 2005. № 5 (294). С. 23–29.
76. Техніка і електрофізика високих напруг / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. Харків: НТУ "ХПІ". 2005. 930 с.
77. Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Г.В. Системный подход к освоению производства пожаробезопасных кабельных изделий в ЗАО "Завод "Южкабель". Кабели и провода. 2007. № 4 (305). С. 26–30.
78. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М. Научно-технические основы повышения ресурса и надежности пожаробезопасных кабелей с полимерной изоляцией для тепловой и атомной энергетики, высотных и подземных сооружений. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. К.: Ін-т електрозварювання НАН України. 2009. С. 326–332.

79. Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Принципы построения и тенденции развития пожаробезопасных кабелів. Техн. електродинаміка. Темат. вип. 2010. Ч. 2. С. 73–80.
80. Beigert M., Kranz H.G. Destruction Free Ageing Diagnosis of Power Cable Insulation Using the Isothermal Relaxation Current Analysis. Proceedings of IEEE ISEI, 1994. P. 17–21.
81. Балашов А.И., Боев М.А., Воронцов А.С. и др. Кабели и провода. Основы кабельной техники / Под ред. И.Б. Пешкова. М.: Энергоатомиздат, 2009. 470 с.
82. Densley J. Ageing Mechanisms and Diagnostics for Power Cables. An Overview IEEE Trans. on Electrical Insulation, January/February. 2001. Vol. 17. P. 14–22.
83. Fromm U. Optimized conductors for XLPE cables with a large crosssection. European Trans. on Electrical Power. 2005. p. 109–121.
84. Peschke E.F., R. von Olshausen Cable Systems for High and Extra-High Voltage. Berlin: Pirelli Kabel und Systeme GmbH, 1999. 296 p.
85. Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Василець Л.Г., Тулєєва О.В. Надійність кабельно-провідникової продукції. Методи підтвердження на основі експериментальних досліджень. Вісн. НТУ "ХПІ". 2006. Вип. 34. С. 3–12.
86. Файбисович Д. Л. Кабельные линии сверхвысокого напряжения. Зарубежный опыт строительства. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/25/12.php>. (дата звернення 15.02.2018).
87. Extra High Voltage Cable Lines in the Word URL: <https://www.tdworld.com/> (дата звернення 4.05.2018).

88. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Л.: Наука, 1988. 302 с.
89. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line. In IEEE Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2017. pp. 448–451.
90. Лободзинський В.Ю. Аналіз установившихся, імпульсних і перехідних електромагнітних процесів в кабельних лініях високого напруги. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.
91. Aloui T., F. Ben Amar, Abdallah H. H. Modeling of a three-phase underground power cable using the distributed parameters approach. Eighth International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. Sousse. 2011. pp. 1-6.
92. Benato R. Multiconductor analysis of underground power transmission systems: EHV AC cables. Electric Power Systems Research. 2009. pp. 27-38.
93. Escané J. M. Réseaux d'énergie électrique, Modélisation : lignes, câbles, ed., Eyrolles. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. 1997. N°12.
94. Kane M., Ahmad A., Auriol P. Multiwire Shielded Cable Parameter Computation. IEEE Transactions on magnetic. 1995. 31/ 3. pp. 1646- 1649.
95. El Sayed Tag El Din and lee , Fault Location Scheme for Combined Overhead Line with Underground Power Cable. Electric Power Systems Research. 2006. Vol.76. pp. 988-935.

96. Chee-Wooi Ten and lee. Fault Location for Underground Power Cable Using Distributed Parameter Approach. IEEE Transaction on Power Systems. 2008. Vol.23, No.4 2008, pp.1809-1816.
97. Лободзинський В.Ю. Аналіз перенапруг та струмів однорідної довгої лінії при несиметричних коротких замиканнях. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017. №2. С. 38–44.
98. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 96–102.
99. Aloui T., Ben Amar F., Derbel N., Hadj Abdallah Hs. Real time Prelocalisation of Electrical Defaults on High Voltage Underground Cable (single-phase case). International Conference on Dynamical Systems and Control, 2010. pp. 137-143.
100. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 2. Л.: Энергия, 1967. 408 с.
101. Гантмахер Ф.Р., Теория матриц. М.: Наука, 1966. 452 с.
102. Лободзинський В. Ю., Довгаль М. О., Мудрик В. І. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів при пошкодженні кабельної лінії електропередачі. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки». 2018. Том 29 (68), №2. С. 46–50.
103. Щерба А. А., Лободзинський В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной кабельной линии электропеедачи при разных транспозициях экранов

однофазных кабелей. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2011. Ч.2. С. 271–276.

104. Лободзинський В. Ю., Щерба А. А. Моделирование и анализ переходных процессов в трехфазной высоковольтной кабельной линии. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.4. С. 151–156.

105. Chibelis V., Lobodzinskyi V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol.6, №2. pp. 63–66.

106. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 с.

107. Коврыгин Л.А. Продольные токи в экранах кабеля. Кабель-News. 2009. № 3. С.56-58.

108. Супруновская Н.И., Подольцев Д.А. Моделирование электромагнитных процессов в высоковольт-ной кабельной линии 110 кВ и перенапряжений в экранах кабелей. Техн. електродинаміка. Тем. вип. 2007. Ч. 3. С. 99–104.

109. Лободзинський В.Ю., Метельская О.В. Анализ переходных процессов при подключении имитационной модели кабельной линии к источнику питания. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2014. С. 583–585.

110. Чабан А.В., Левонюк В.Р., Дробот І.М., Герман А.Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. Електротехніка і електромеханіка. 2016. №13. с. 30-35.

111. Чибеліс В. І. Лободзинський В.Ю. Аналіз методів розрахунку електромагнітних перехідних процесів багатофазних ліній

електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи». 2017. № 870. С. 76–82.

112. Рехепапп Ю.А., Силламаа Х.В. Матричное описание многополюсников. Радиотехника. 1972. т.27. № 12. с.26-31.

113. Яворская М.И. Топологические методы анализа электрических цепей с многополюсниками: автореф. дис ... канд. техн. наук. Львов, 1983. 24 с.

114. Курганов С.А. Символьный анализ и диакоптика линейных электрических цепей: авторе. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2006. 34 с.

115. Воронов Р.А. Общая теория четырехполюсников и многополюсников. М.: Госэнергоизд. 1951. 342 с.

116. Силламаа Х.В. Некоторые общие свойства множества многополюсников. Труды Таллинского политехн. ин-та, 1974. вып.371. с.3–12.

117. Chua L., Leon B.J. A unified theory of linear N-port networks. Proc. third annual allerton conf. on COT.X.1965. Allerton Hose Monticello, Illinois, p. 502-601.

118. Лободзинський В.Ю., Пустовий Т. П., Комісарова І. П. Аналіз методів моделювання елементів кабельних ліній у фазних координатах на основі теорії багатополісників. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2015. С. 478-480.

119. Лободзинський В.Ю., Ілліна О. О., Губчук А. Є. Методологічний підхід для побудови моделей статичних багато провідних елементів. Сучасні

проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2016. С. 423-425.

120. Лободзинський В.Ю., Жук Б.О. Математическая модель расчета эквивалентных однофазных схем замещения трехфазных схем с взаимоиндуктивными связями в виде четырехполюсника. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

121. Lobodzinskiy V., Maslak M. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks. In IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). 2015. pp. 96-98.

122. Muyeen S. M., Yamada T., Arai J., Higashikawa K., Ikeda H., Harid N., Al-Durra A. Switching Transients at Cable Transmission System. Conference: International Workshop on High Voltage Engineering IWHV, 2016. pp. 1-6.

123. Khalilnezhad H., Popov M., L. van der Sluis, J. P. W. de Jong, Nenadovic N., Bos J. A. Assessment of line energization transients when increasing cable length in 380 KV power grids. IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Wollongong, 2016, pp. 1-6.

124. Koshizuka T., Taniguchi Y., Haginomori E., Ikeda H., Udagawa K. Current Zero at prospective Transient Recovery Voltage Measurement. IEEJ Transactions on Power and Energy. Vol.136. No.2. pp.170-174.

125. Koshizuka T., Kudo K., Nakamoto T., Haginomori E., Ibuki K., Ikeda H. Investigation of Tangential Line and Prospective Values for TRV Measurements/' IEEJ Transactions on Power Energy. vol.133. No.11. pp.826-831.

126. Sheng B.L. Design Consideration of Weil-Dobke Synthetic Testing Circuit for the Interrupting Testing of HVAC Circuit Breakers. IEEE Power Engineering Society Conference. pp.295-299.

127. Лободзинський В.Ю., Худик А.И. Математическая модель анализа перенапряжений на изоляции экрана в схеме с заземлением экранов по концам участка кабельной линии высокого напряжения. Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 578–580.

128. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Василец Л.Г. Компьютерное моделирование переходных процессов в высоковольтной кабельной линии с транспозицией экранов. Техн. електродинаміка. 2006. № 6. С. 3–13.

129. Копырюлин П.В., Гольдштейн В.Г. Анализ способов ограничения продольных токов в экранах однофазных кабелей трехфазной системы. Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Иваново, 2013. С. 254-256.

130. Jung C.K., Lee J.B., Kang J.W. Sheath circulating current analysis of a crossbonded power cable systems. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2007. Vol. 2. No. 3.

131. Копырюлин П.В., Гольдштейн В.Г., Танаев А.К. Способы борьбы с индуцированными токами в экранах однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена 6-110 кВ. Сб. статей по 4 международной научно-практической конференции «Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах». Пенза, 2013. С. 28-31.



132. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Однофазные кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Расчет заземления экранов. Новости электротехники. 2016. №2 (98).

133. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І., Щерба А. А. Аналіз перехідних процесів і перенапружень при комутаціях кабельної лінії електропередачі в сверхвысоковольтних трехфазних електричних сетях. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.1. С. 155–158.

134. Лободзинський В.Ю. Дослідження форм кривих перехідного процесу при комутаціях. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. №47. С. 11–15.

135. Лободзинський В.Ю., Чибеліс В.І., Фаріна О.А. Аналіз перехідних процесів і перенапружень при відключенні ненапружених ліній електропередачі. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 583–585.

136. Лободзинський В.Ю., Солоп Б.К. Аналіз розрахунку електромагнітних перехідних процесів в трехфазних цепях при произвольной коммутации. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

137. Лободзинський В.Ю. Аналіз методики чисельного розрахунку перехідних процесів при комутаціях кабельних ліній. Inżynieria i technologia. Współczesne tendencje w nauce i edukacji. Konferencji międzynarodowej naukowo praktycznej. Kraków (Poland). 2016. pp. 33–38.

138. Lobodzinskiy V., Tsyban Y., Lobodzinskaya T. Analysis of transients in case of changing a phase of power source at the moment of connection with cable lines. Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na

rok 2016. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej. Zakopane (Poland). 2016. pp. 62–65.

139. Лободзинський В.Ю. Теоретичні дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях високовольної кабельної лінії. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчуг. 2016. С. 239–241.

140. Завдання на проектування дволанцюгової кабельної електролінії 330 кВ зовнішнього електропостачання електросталеливарного комплексу на ділянці від Придністровської ТЕС до підстанції 330/35/10 кВ «Пічна», затверджено ТОВ «Металургійний завод «Дніпросталь». 11.07.08.

141. Основні технічні вимоги до улаштування кабельної електролінії напругою 330 кВ для зовнішнього електропостачання електросталеливарного комплексу від Придніпровської ТЕС до підстанції «Пічна» 330/35/10 кВ «Пічна», затверджено ТОВ «Металургійний завод «Дніпросталь». 20.01.09.

142. Кабельна електролінія напругою 330 кВ для зовнішнього електропостачання електросталеплавильного комплексу на ділянці від Придніпровської ТЕС до підстанції 330/35/20 кВ «Пічна». Загальна пояснювальна записка. 7485.00-ПЗ. – Укрсілэнергопроект, 2009.

143. Руководство по выбору, подкладке, монтажу, испытаниям и эксплуатациям кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ.– ЗАТ Южкабель, 2006.

144. Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожаробезопасности. РД К28-006:2013. Под. общ. ред. В.М.Золотарева, А.А.Щербы. Харьков: Майдан. 2013. 50 с.

145. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. РД К28-007:2017. Под. общ. ред. В.М.Золотарева, А.А.Щербы. Харьков: Майдан. 2017. 63 с.

## ДОДАТОК А

### Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

#### Статті у фахових наукових виданнях України:

1. Щерба А. А., Лободзинський В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных переходных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2011. Ч.2. С. 271 – 276.
2. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І., Щерба А. А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при коммутациях кабельной линии электропередачи в сверхвысоковольтных трехфазных электрических сетях. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.1. С. 155–158.
3. Лободзинський В. Ю., Щерба А. А. Моделирование и анализ переходных процессов в трехфазной высоковольтной кабельной линии. Техн. електродинаміка. Тем. випуск. 2012. Ч.4. С. 151–156.
4. Chibelis V., Lobodzinskyi V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. Computational Problems of Electrical Engineering. 2016. Vol.6, №2. pp. 63–66.
5. Лободзинський В.Ю. Аналіз перенапруг та струмів однорідної довгої лінії при несиметричних коротких замиканнях. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2017. №2. С. 38–44. – *Входить до МНМБД Index Copernicus.*
6. Лободзинський В.Ю. Дослідження форм кривих перехідного процесу при комутаціях. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. №47. С. 11–15. – *Входить до МНМБД Elibrary.*

7. Чибеліс В. І. Лободзинський В.Ю. Аналіз методів розрахунку електромагнітних перехідних процесів багатофазних ліній електропередавання з розподіленими параметрами типу кабельних ліній високої напруги. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Електроенергетичні та електромеханічні системи». 2017. № 870. С. 76–82.

8. Лободзинський В. Ю., Чибеліс В. І. Математична модель трифазної лінії з розподіленими параметрами при електромагнітних перехідних процесах. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки. 2018. № 4. С. 96–102. – *Входить до МНМБД Index Copernicus.*

9. Лободзинський В. Ю., Довгаль М. О., Мудрик В. І. Комп'ютерне моделювання перехідних процесів при пошкодженні кабельної лінії електропередачі. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського, серія «Технічні науки». 2018. Том 29 (68), №2. С. 46–50. – *Входить до МНМБД Index Copernicus.*

#### **Тези доповідей на наукових конференціях:**

10. Lobodzinskiy V., Maslak M. Mathematical modeling of the three-phase high-voltage cable lines under the theory of multiterminal networks. In IEEE Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). 2015. pp. 96-98.

11. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line. In IEEE Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2017. pp. 448–451

12. Лободзинський В.Ю., Худик А.И. Математическая модель анализа перенапряжений на изоляции экрана в схеме с заземлением экранов по концам участка кабельной линии высокого напряжения. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-

технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 578–580.

13. Лободзинський В.Ю., Чибелис В.И., Фаріна О.А. Анализ переходных процессов и перенапряжений при отключении ненагруженных линий электропередачи. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2012. С. 583–585.

14. Лободзинський В.Ю. Анализ установившихся, импульсных и переходных электромагнитных процессов в кабельных линиях высокого напряжения. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

15. Лободзинський В.Ю., Жук Б.О. Математическая модель расчета эквивалентных однофазных схем замещения трехфазных схем с взаимоиндуктивными связями в виде четырехполюсника. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

16. Лободзинський В.Ю., Солоп Б.К. Анализ расчета электромагнитных переходных процессов в трехфазных цепях при произвольной коммутации. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2013. С. 583–585.

17. Лободзинський В.Ю., Метельская О.В. Анализ переходных процессов при подключении имитационной модели кабельной линии к источнику питания. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики:

матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2014. С. 583–585.

18. Лободзинський В.Ю., Пустовий Т. П., Комісарова І. П. Аналіз методів моделювання елементів кабельних ліній у фазних координатах на основі теорії багатополюсників. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2015. С. 478-480.

19. Лободзинський В.Ю., Ілліна О. О., Губчук А. Є. Методологічний підхід для побудови моделей статичних багато провідних елементів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики: матеріали міжнародної науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів і студентів. Київ. 2016. С. 423-425.

20. Лободзинський В.Ю. Аналіз методики чисельного розрахунку перехідних процесів при комутаціях кабельних ліній. Inzynieria i technologia. Wspolczesne tendencje w nauce i edukacji. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej. Kraków (Poland). 2016. pp. 33–38.

21. Lobodzinskiy V., Tsyban Y., Lobodzinskaya T. Analysis of transients in case of changing a phase of power source at the moment of connection with cable lines. Inzynieria i technologia. Osiagniecia naukowe, rozwoj, propozycje na rok 2016. Konferencji miedzynarodowej naukowo praktycznej. Zakopane (Poland). 2016. pp. 62–65.

22. Лободзинський В.Ю. Теоретичні дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях високовольної кабельної лінії. Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук. 2016. С. 239–241.

## **ДОДАТОК Б**

### **Акти впровадження результатів дисертаційної роботи**

Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи з розвитку теорії перехідних процесів в трифазних кабельних лініях, які моделюються як кола з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками використано на заводі «Південкабель», Інституті електродинаміки НАН України та впроваджено у навчальному процесі на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія електричних та магнітних кіл».



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Генеральний директор ПАТ "Завод  
Південкабель", д.т.н., професор



В.М. Золотарьов

22.05.2019 р.

### А К Т

#### впровадження результатів Лободзинського В.Ю.

Даний акт підтверджує, що наукові результати, отримані асистентом кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" Лободзинським В.Ю. при виконанні НДР "Створення енергоефективної резонансної установки для нормативних випробувань вітчизняних кабелів зі ЗПЕ ізоляцією на надвисокі напруги" (№ ДР 0114U000580) та "Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокі напруги" (№ ДР 016U003716), впроваджено на ПАТ "Завод Південкабель" (м. Харків) при створенні електротехнологічного комплексу промислового виробництва, випробувань та сертифікації кабельних систем зі зшитю поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією на напруги до 400 кВ. Отримані результати використовуються на двох технологічних лініях промислового виробництва вітчизняних кабелів зі зшитю поліетиленовою ізоляцією на високі та надвисокі напруги.

Найбільш важливими науковими результатами, що використовуються на заводі, є розроблені Лободзинським В.Ю. метод, комп'ютерна модель і методика розрахунку перехідних електромагнітних процесів у електричних колах з розподіленими параметрами (зокрема в трифазних кабельних лініях електропередачі надвисоких напруг) на основі їх представлення багатополісними елементами із зосередженими параметрами та урахуванням взаємних міжфазних індуктивних та ємнісних зв'язків. На основі моделювання та аналізу перехідних напруг і струмів у трифазних кабельних лініях електропередачі, як трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними електромагнітними зв'язками, було визначено особливості виникнення власних електромагнітних коливань при складних граничних умовах і комутаціях.

В.Ю. Лободзинський удосконалив математичну модель для розрахунку перехідних електромагнітних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі на основі використання теорії багатополісників і врахування впливу наведених електрорушійних сил на індуковані струми в

екранах кабелів при різних їх транспозиціях, що дозволяє визначати необхідні переріз екранів та кількість їх транспозицій.

Наукові результати, що отримав Лободзинський В.Ю., використано при розробці методично-керівного документів РД К28-006:2013 «Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожаробезопасности» та РД К-007:2017 «Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения». Дані документи узагальнюють сучасні вимоги до проектування та експлуатації кабельних ліній надвисоких напруг згідно стратегічних орієнтирів розвитку України на період до 2035 року в напрямку підвищення ефективності та економічності електричних мереж шляхом їх переведення на більш високий клас напруги. Ці орієнтири визначено Новою енергетичною стратегією України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоздатність» згідно розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605.

Головний інженер, к.т.н.



Ю.П. Антонєць

Директор НТЦ, к.т.н.



О.В. Чулеєва

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електродинаміки  
НАН України, академік НАН України



 О.В. Кириленко

## А К Т

### використання наукових результатів Лободзинського В.Ю. в Інституті електродинаміки НАН України

Чинний акт підтверджує, що В.А. Лободзинський у 2012–2017 рр. приймав участь у виконанні окремих етапів фундаментальної НДР "Розвинути теорію регулювання динамічних характеристик електророзрядних систем та часткових розрядів і електромагнітних напружень у полімерній ізоляції високовольтного обладнання" (шифр "Імроз", № ДР 0112U008204), що виконувалась за Постановою Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України (протокол № 14 від 25.09.2012 р.), а в 2018–2019 рр. – фундаментальної НДР "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у високовольтних кабельних лініях і установках резонансного типу" (Шифр "Елкаб", № ДР 0117U007713), що виконувалась за Постановою Бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України (протокол № 11 від 04.07.2017 р.).

При виконанні НДР "Імроз" Лободзинський В.А. розвинув методи аналізу та розробив математичну модель для розрахунку перехідних процесів у трифазних колах із розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками (зокрема трифазних надвисоковольтних кабельних ліній електропередачі) на основі представлення таких кіл багатополісниками, знаходження їхніх відповідних зосереджених параметрів таких та визначення граничних і початкових умов виникнення перехідних процесів. Отриманні ним наукові результати використанні при розробці Інститутом електродинаміки НАН України, ПАТ "Завод Південкабель", НТУ "Хар-



ківський політехнічний інститут" та НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" науково-методичних видань "Руководящий технический материал по нормативной базе, применяемым материалам, конструктивным особенностям, испытаниям и выбору кабелей и проводов повышенной пожаробезопасности", РД К28-006:2013, Харьков: Майдан, 2013, с. 50 та "Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных диний сверхвысокого напряжения", РД К28-007:2017, Харьков: Майдан, 2017, с. 64.

При виконанні НДР "Елкаб" В.А. Лободзинський на основі аналізу змінення напруг і струмів при виникненні перехідних процесів у трифазних кабельних лініях електропередачі, що мають розподілені параметри і міжфазні взаємоіндуктивні та ємнісні зв'язки, визначив особливості появи власних електромагнітних коливань у таких ліній електропередачі. Урахування виявлених особливостей забезпечило визначення умов обмеження недопустимих напруг і струмів при різних підключеннях кабельних ліній до трифазної мережі електроживлення.

Провідний наук. співр. від. № 16, д.т.н.



Н.І. Супруновська

Старший наук. співр.



М.О. Ломко

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету електро-  
енерготехніки та автоматики  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»



О.С.Яндульський

2019 р.

### АКТ

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи  
Лободзинського Вадима Юрійовича «Перехідні процеси в представлених  
багатополюсниками трифазних колах із розподіленими параметрами та  
електромагнітними зв'язками» в навчальний процес кафедри теоретичної  
електротехніки

Комісія у складі:

Голова – завідувач кафедри теоретичної електротехніки, д.т.н. проф.  
Островерхов М.Я.

Члени комісії: лектори кредитних модулів «Теоретичні основи  
електротехніки» д.т.н., проф. Бойко В.С., к.т.н., доц., Чибеліс В.І., вчений  
секретар кафедри к.т.н., доц. Спінул Л.Ю.

цим актом засвідчує, що в результаті виконання дисертаційної роботи  
«Перехідні процеси в представлених багатополюсниками трифазних колах із  
розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками»  
Лободзинським В.Ю. отримано нові наукові результати, зокрема

– розвинуто метод розрахунку електромагнітних перехідних процесів у  
трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та взаємними

міжфазними зв'язками, шляхом представлення цих кіл багатополіусниками із зосередженими параметрами, що враховують особливості міжфазних електромагнітних зв'язків;

– розроблено нову математичну модель розгалужених трифазних електричних кіл із розподіленими параметрами та міжфазними зв'язками на основі складання диференціальних рівнянь стану цих кіл, визначення граничних і початкових умов розрахунку виникаючих в них перехідних процесів при нормальних і аварійних умовах урахуванні взаємних наявних міжфазних зв'язків.

Отримані наукові результати використовуються у навчальному процесі кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при проведенні лекційних, практичних і лабораторних занять з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» у розділах «Усталені процеси в електричних і магнітних колах, що мають довгі лінії з розподіленими параметрами» та «Перехідні процеси в трифазних електричних колах з розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками»

Голова комісії:

д.т.н., проф.



М.Я. Островерхов

Члени комісії:

д.т.н., проф.



В.С. Бойко

к.т.н., доц.



В.І. Чибеліс

к.т.н., доц.



Л.Ю. Спінул